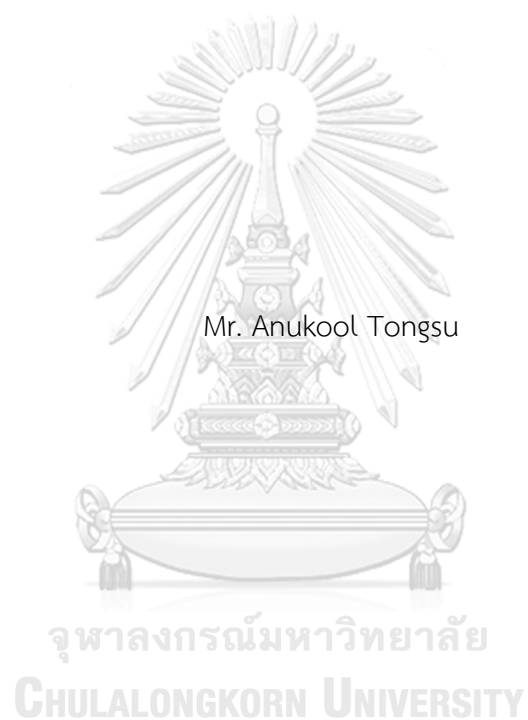


การพัฒนาอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายตามมาตรฐาน IEC 61850 ผ่านเครือข่าย
NB-IoT



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF MONITORING DEVICE FOR DISTRIBUTION TRANSFORMER
ACCORDING TO IEC 61850 VIA NB-IoT NETWORK



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ตามมาตรฐาน IEC 61850 ผ่านเครือข่าย NB-IoT
โดย	นายอนุกุล ต້องสู
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.วันเฉลิม โปรา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรียะ พุ่มรินทร์)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.วันเฉลิม โปรา)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีลาวัณย์)	

CHULALONGKORN UNIVERSITY

อนุญัตต์ ต้องสุ้ : การพัฒนาอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายตาม
มาตรฐาน IEC 61850 ผ่านเครือข่าย NB-IoT. (DEVELOPMENT OF MONITORING
DEVICE FOR DISTRIBUTION TRANSFORMER ACCORDING TO IEC 61850 VIA
NB-IoT NETWORK) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.วันเฉลิม โปธา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการพัฒนาอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย
และการส่งข้อมูลการเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายตามมาตรฐาน IEC61850 ซึ่งมี
ค่าใช้จ่ายในการรับส่งข้อมูลสูง ผ่านเครือข่าย NB-IoT ที่มีแถบความกว้างข้อมูลต่ำ เพื่อตรวจสอบ
สภาวะการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ซึ่ง
มาตรฐาน IEC61850 นิยมใช้งานอย่างแพร่หลายในสถานีไฟฟ้า เพื่อพัฒนาให้เป็นระบบสถานี
ไฟฟ้าอัตโนมัติ (Substation Automation System ; SAS) โดยมีจุดเด่นในการทำงานร่วมกันได้
ของ Multi-vender และการสื่อสารด้วยความเร็วสูงระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะ
(Intelligent Electronic Device ; IED) วิทยานิพนธ์นี้จึงได้ประยุกต์นำเอามาตรฐาน IEC61850
มาใช้กับระดับของระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ซึ่งเป็นระดับล่างถัดจาก
สถานีไฟฟ้า เพื่อเป็นแนวทางให้อุปกรณ์ในโครงข่ายไฟฟ้าสามารถทำงานร่วมกันและแลกเปลี่ยน
ข้อมูลระหว่างกันได้มากขึ้น สำหรับการพัฒนาชุดข้อมูลที่นำเสนอ นั้น ได้ออกแบบการทดสอบการ
สื่อสารข้อมูลกับซอฟต์แวร์ IED Explorer ที่สามารถตรวจสอบตัวแปรของชุดข้อมูล MMS ที่
พัฒนาขึ้นตามมาตรฐาน IEC61850 เพื่อตรวจสอบว่าอุปกรณ์ทั้งสองสามารถทำงานร่วมกันได้และ
ชุดข้อมูลที่พัฒนาขึ้นเป็นไปตามมาตรฐาน IEC61850

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6170415021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: Monitoring Device for Distribution Transformer, IEC 61850, NB-IoT

Anukool Tongsu : DEVELOPMENT OF MONITORING DEVICE FOR DISTRIBUTION TRANSFORMER ACCORDING TO IEC 61850 VIA NB-IoT NETWORK. Advisor: Assoc. Prof. WANCHALERM PORA, Ph.D.

This thesis proposes the development of monitoring devices for distribution transformers and data transmission, monitoring of distribution transformers according to IEC61850 standards, which have high data transmission overhead. Over the NB-IoT network that has low bandwidth. To check the operating conditions of the distribution transformers of the Provincial Electricity Authority (PEA). Which IEC61850 standard is widely used in substations. To develop into a Substation Automation System (SAS). With the strengths of multi-vendor compatibility and high-speed communication between intelligent electronic devices (IED). This thesis has applied the standard of IEC61850 to the level of power distribution systems at transformers for distribution systems, which is the lower level next to the power station. To provide a way for devices in the electricity network to be able to work together and exchange more information between them. For the development of the proposed data set Has designed a data communication test with IED Explorer software that can detect the parameters of MMS data sets developed according to the IEC61850 standard. To verify that both devices are compatible and the developed data set conforms to the IEC61850 standard.

Field of Study: Electrical Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2020

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างสูงจากรศ. ดร. วันเฉลิม โปรา ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและคอยสนับสนุน อีกทั้งยังแนะนำวิธีการแก้ไขปัญหาและอุปสรรคที่เกิดขึ้น ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง ข้าพเจ้าตระหนักถึงความตั้งใจและความทุ่มเทของอาจารย์ ข้าพเจ้าจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผศ. ดร. สุรียีย์ พุ่มรินทร์ ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์ และ รศ. ดร. เอกชัย ลีลารัมย์ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ท่านกรุณาให้เกียรติมาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งแนะนำแนวทางและคำแนะนำในการทำงานวิจัย พร้อมทั้งตรวจสอบแก้ไขให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ครู อาจารย์ทุกท่าน ตั้งแต่อดีตจวบจนถึงปัจจุบันนี้ ที่ได้เอื้อนนามที่เป็นผู้ประสาทวิชาให้แก่ข้าพเจ้า และขอขอบคุณเพื่อนนักศึกษาในห้องปฏิบัติการวิจัยระบบสมองกลฝังตัวและการออกแบบวงจรรวม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับการแลกเปลี่ยนความรู้และประสบการณ์ที่ดีต่อกัน

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ กองหม้อแปลง การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ที่ให้ความรู้ที่สำคัญ และถ่ายทอดประสบการณ์ตรงเกี่ยวกับหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายของ กฟภ. อันเป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัยของข้าพเจ้า

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณโครงการความร่วมมือทางวิชาการระหว่าง การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) กับจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในการให้ทุนการศึกษาเพื่อพัฒนาบุคลากร ระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ด้าน Smart Grid ที่ได้ให้โอกาสข้าพเจ้าพัฒนาศักยภาพทางวิชาการให้สูงขึ้น โดยความรู้ที่ได้จากการศึกษาและงานวิจัยนี้ ข้าพเจ้าจะนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อ กฟภ. ให้มากที่สุด

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ครอบครัว และกัลยาณมิตร ที่ได้ให้ความช่วยเหลือค่าจุนและเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

อนุกุล ต้องสู้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์.....	4
1.7 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	8
2.1.1 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	9
2.1.2 ชนิดของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	10
2.1.3 การระบายความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	11
2.1.4 กำลังไฟฟ้าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	13
2.2 ไอซีวัตพลังงานไฟฟ้า STPM34	16

2.2.1	หลักการทํางานของไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34	16
2.2.2	ระบบการวัดพลังงานไฟฟ้าของไอซี STPM34.....	19
2.2.3	การแปลงค่าพลังงานไฟฟ้าที่อ่านได้จากรีจิสเตอร์ให้เป็นค่าจริง.....	22
2.2.4	โปรโตคอลการสื่อสารของไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34	26
2.3	เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิชนิดป้องกันน้ำ DS18B20	29
2.4	บอร์ด Devio NB-Devkit I	30
2.5	บอร์ด BeagleBone Black	32
2.6	เทคโนโลยี Narrowband IoT (NB-IoT).....	34
2.7	มาตรฐาน IEC61850	35
2.7.1	การอ้างอิงชื่อข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850.....	36
2.7.2	เครือข่ายการสื่อสารตามมาตรฐาน IEC61850.....	40
2.7.3	ไฟล์ Substation Configuration Description Language (SCL File).....	41
บทที่ 3	การออกแบบอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT.....	43
3.1	การออกแบบอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT	43
3.1.1	การออกแบบวงจรลดทอนแรงดันและกระแสไฟฟ้า	46
3.1.2	การออกแบบวงจรวัดแรงดันไฟฟ้า	46
3.1.3	การออกแบบวงจรวัดกระแสไฟฟ้า.....	48
3.2	การออกแบบ Schematic ของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT.....	51
3.2.1	การออกแบบ Schematic ของชุดหน่วยประมวลผลกลาง.....	52
3.2.2	การออกแบบ Schematic ของชุดไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34	53
3.2.3	การออกแบบ Schematic ของชุดเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิชนิดป้องกันน้ำ DS18B20.....	54
3.2.4	การออกแบบ Schematic ของภาคจ่ายไฟฟ้า	55

3.3 การออกแบบลายวงจรพิมพ์สำหรับอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่าน เครือข่าย NB-IoT	56
3.4 การพัฒนาอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT	58
บทที่ 4 การออกแบบชุดข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850.....	62
4.1 การออกแบบและพัฒนาชุดข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850.....	62
4.1.1 การออกแบบ Logical Node	62
4.1.2 การพัฒนาชุดข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 ของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้า	63
บทที่ 5 การออกแบบซอฟต์แวร์ของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายตามมาตรฐาน IEC61850 ผ่านเครือข่าย NB-IoT.....	66
5.1 การออกแบบซอฟต์แวร์ภาคการวัด	66
5.2 การออกแบบซอฟต์แวร์ส่วน Server.....	68
บทที่ 6 การทดสอบและผลการทดสอบ.....	70
6.1 การทดสอบการวัดของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB- IoT	70
6.1.1 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.01I_n \leq I < 0.05I_n$ ที่ตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1	72
6.1.2 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.05I_n \leq I \leq I_{max}$ ที่ตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1.....	73
6.1.3 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.02I_n \leq I < 0.1I_n$ ที่ตัวประกอบกำลัง 0.5 ล้าหลัง... 74	
6.1.4 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.02I_n \leq I < 0.1I_n$ ที่ตัวประกอบกำลัง 0.8 นำหน้า .. 75	
6.1.5 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.1I_n \leq I \leq I_{max}$ ที่ตัวประกอบกำลัง 0.5 ล้าหลัง	76
6.1.6 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.1I_n \leq I \leq I_{max}$ ที่ตัวประกอบกำลัง 0.8 นำหน้า	77
6.1.7 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.1I_n \leq I \leq I_{max}$ ที่ตัวประกอบกำลัง 0.25 ล้าหลัง.....	78
6.1.8 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.1I_n \leq I \leq I_{max}$ ที่ตัวประกอบกำลัง 0.5 นำหน้า	79
6.2 การทดสอบชุดข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850	80
6.2.1 การทดสอบการเชื่อมต่อการสื่อสารตามมาตรฐาน IEC61850	80

6.2.2 การทดสอบชุดข้อมูลเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายตามมาตรฐาน IEC61850	82
บทที่ 7 บทสรุปผลงานวิจัย.....	84
7.1 บทสรุปของงานวิจัย.....	84
7.2 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	85
7.3 ข้อเสนอแนะ	85
บรรณานุกรม.....	86
ประวัติผู้เขียน.....	90



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบ 1 เฟส.....	14
ตารางที่ 2 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบ 3 เฟส.....	15
ตารางที่ 3 อัตราการขยายของช่องแรงดันไฟฟ้า (A_V).....	19
ตารางที่ 4 แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของช่องแรงดันไฟฟ้า (V_{REF})	19
ตารางที่ 5 อัตราการขยายของช่องกระแสไฟฟ้า (A_I)	21
ตารางที่ 6 ความไวของเซ็นเซอร์กระแสไฟฟ้า (K_S)	21
ตารางที่ 7 การเลือกขนาด ซีที. แรงต่ำ.....	44
ตารางที่ 8 การพัฒนาชุดข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 ของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้า ...	64
ตารางที่ 9 ชุดข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 ของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้า.....	65
ตารางที่ 10 ข้อกำหนดหลักเกณฑ์การทดสอบตามมาตรฐาน IEC62053-22 Class 0.5S.....	70

สารบัญรูปร่างภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	9
รูปที่ 2 สัญลักษณ์แสดงวิธีการระบายความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	11
รูปที่ 3 วิธีการระบายความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ ONAN.....	12
รูปที่ 4 ไอซีวัตพลังงานไฟฟ้า STPM34 [10]	16
รูปที่ 5 หลักการวัดพลังงานไฟฟ้าของไอซี STPM34 [11].....	17
รูปที่ 6 ระบบการวัดพลังงานไฟฟ้าของไอซี STPM34 [11]	19
รูปที่ 7 รีจิสเตอร์ภายในไอซี STPM34 ที่เก็บค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าประสิทธิผล [12]	22
รูปที่ 8 สูตรที่ใช้ในการแปลงค่าจากรีจิสเตอร์ให้เป็นค่าจริง [13].....	23
รูปที่ 9 สูตรการแปลงค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าประสิทธิผลจากรีจิสเตอร์ให้เป็นค่าจริง [13].....	23
รูปที่ 10 โครงสร้าง Communication Session [13].....	26
รูปที่ 11 Single Communication Time Frame [13]	26
รูปที่ 12 การเชื่อมต่อผ่านโปรโตคอลการสื่อสาร SPI แบบ Mono Phase [12]	27
รูปที่ 13 แผนผังการอ่านค่าทางไฟฟ้าของไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 จำนวน 2 ชุด	28
รูปที่ 14 เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิชนิดป้องกันน้ำ DS18B20 [14]	29
รูปที่ 15 บอร์ด Devio NB-Devkit I [15].....	30
รูปที่ 16 Pinout ของบอร์ด Devio NB-Devkit I [15]	31
รูปที่ 17 บอร์ด BeagleBone Black [16].....	32
รูปที่ 18 ภาพรวมของเทคโนโลยี LPWAN [17].....	34
รูปที่ 19 แนวคิดการทำงานของมาตรฐาน IEC61850 [7].....	35
รูปที่ 20 องค์ประกอบการอ้างอิงชื่อข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 [18].....	36
รูปที่ 21 ตัวอย่างโครงสร้างชื่อข้อมูล MMS ตามมาตรฐาน IEC61850 [7]	37

รูปที่ 22 ตัวอย่างการออกแบบโครงสร้างชื่อข้อมูล MMS ตามมาตรฐาน IEC61850	38
รูปที่ 23 ข้อความข้อมูล MMS [7].....	39
รูปที่ 24 การสื่อสารระหว่าง Client กับ Server แบบ TPAA [20].....	40
รูปที่ 25 การยกเลิกการสื่อสารระหว่าง Client กับ Server แบบ TPAA [20].....	40
รูปที่ 26 การสื่อสารระหว่าง Client กับ Server แบบ MCAA [20]	41
รูปที่ 27 ตัวอย่างไฟล์ Substation Configuration Description Language [18]	41
รูปที่ 28 การออกแบบการวัดค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย.....	43
รูปที่ 29 การออกแบบอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย	45
รูปที่ 30 การออกแบบวงจรลดทอนแรงดันและกระแสไฟฟ้า.....	46
รูปที่ 31 การออกแบบวงจรวัดแรงดันไฟฟ้า.....	47
รูปที่ 32 การออกแบบวงจรวัดกระแสไฟฟ้า	48
รูปที่ 33 หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า VAC 4626-X002	48
รูปที่ 34 การเปรียบเทียบค่า LSB ฐานสิบของรีจิสเตอร์กับค่าจริงของแรงดันไฟฟ้าประสิทธิภาพ ที่ไอซี STPM34 วัดได้.....	50
รูปที่ 35 การเปรียบเทียบค่า LSB ฐานสิบของรีจิสเตอร์กับค่าจริงของกระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพ ที่ไอซี STPM34 วัดได้.....	50
รูปที่ 36 Schematic ของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT. 51	
รูปที่ 37 Schematic ของชุดหน่วยประมวลผลกลาง	52
รูปที่ 38 Schematic ของชุดไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34	53
รูปที่ 39 Schematic ของชุดเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิชนิดป้องกันน้ำ DS18B20	54
รูปที่ 40 Schematic ของภาคจ่ายไฟฟ้า.....	55
รูปที่ 41 หน้าต่างสำหรับการออกแบบลายวงจรพิมพ์.....	56
รูปที่ 42 การออกแบบลายวงจรพิมพ์สำหรับอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ผ่านเครือข่าย NB-IoT	57

รูปที่ 43 ลายวงจรมิพพ์ด้าน Top Layer ของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT	57
รูปที่ 44 ลายวงจรมิพพ์ด้าน Bottom Layer ของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT	58
รูปที่ 45 แผ่นวงจรมิพพ์ด้าน Top Layer ของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT	59
รูปที่ 46 แผ่นวงจรมิพพ์ด้าน Bottom Layer ของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT	59
รูปที่ 47 การประกอบอุปกรณ์ลงบนแผ่นวงจรมิพพ์.....	60
รูปที่ 48 อุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT	61
รูปที่ 49 แนวคิดการออกแบบ Logical Node.....	62
รูปที่ 50 แผนผังการกำหนดค่าเริ่มต้นการทำงานของไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34.....	66
รูปที่ 51 แผนผังการอ่านค่าการวัดของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย	67
รูปที่ 52 การออกแบบซอฟต์แวร์ส่วนเซิร์ฟเวอร์.....	68
รูปที่ 53 การออกแบบการสื่อสารข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 ผ่านเครือข่าย NB-IoT	69
รูปที่ 54 การต่อวงจรการทดสอบการวัดค่าทางไฟฟ้า.....	71
รูปที่ 55 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.01I_n \leq I < 0.05I_n$ ที่ P.F. 1.0 เฟส L ₁	72
รูปที่ 56 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.01I_n \leq I < 0.05I_n$ ที่ P.F. 1.0 เฟส L ₂	72
รูปที่ 57 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.01I_n \leq I < 0.05I_n$ ที่ P.F. 1.0 เฟส L ₃	72
รูปที่ 58 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.05I_n \leq I \leq I_{max}$ ที่ P.F. 1.0 เฟส L ₁	73
รูปที่ 59 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.05I_n \leq I \leq I_{max}$ ที่ P.F. 1.0 เฟส L ₂	73
รูปที่ 60 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.05I_n \leq I \leq I_{max}$ ที่ P.F. 1.0 เฟส L ₃	73
รูปที่ 61 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.02I_n \leq I < 0.1I_n$ P.F. 0.5 ล้าหลังเฟส L ₁	74
รูปที่ 62 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.02I_n \leq I < 0.1I_n$ P.F. 0.5 ล้าหลังเฟส L ₂	74
รูปที่ 63 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.02I_n \leq I < 0.1I_n$ P.F. 0.5 ล้าหลังเฟส L ₃	74

รูปที่ 64 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.02I_n \leq I < 0.1I_n$ P.F. 0.8 นำหน้าเฟส L_1	75
รูปที่ 65 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.02I_n \leq I < 0.1I_n$ P.F. 0.8 นำหน้าเฟส L_2	75
รูปที่ 66 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.02I_n \leq I < 0.1I_n$ P.F. 0.8 นำหน้าเฟส L_3	75
รูปที่ 67 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.1I_n \leq I \leq I_{max}$ P.F. 0.5 ล้าหลังเฟส L_1	76
รูปที่ 68 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.1I_n \leq I \leq I_{max}$ P.F. 0.5 ล้าหลังเฟส L_2	76
รูปที่ 69 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.1I_n \leq I \leq I_{max}$ P.F. 0.5 ล้าหลังเฟส L_3	76
รูปที่ 70 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.1I_n \leq I \leq I_{max}$ P.F. 0.8 นำหน้าเฟส L_1	77
รูปที่ 71 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.1I_n \leq I \leq I_{max}$ P.F. 0.8 นำหน้าเฟส L_2	77
รูปที่ 72 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.1I_n \leq I \leq I_{max}$ P.F. 0.8 นำหน้าเฟส L_3	77
รูปที่ 73 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.1I_n \leq I \leq I_{max}$ P.F. 0.25 ล้าหลังเฟส L_1	78
รูปที่ 74 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.1I_n \leq I \leq I_{max}$ P.F. 0.25 ล้าหลังเฟส L_2	78
รูปที่ 75 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.1I_n \leq I \leq I_{max}$ P.F. 0.25 ล้าหลังเฟส L_3	78
รูปที่ 76 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.1I_n \leq I \leq I_{max}$ P.F. 0.5 นำหน้าเฟส L_1	79
รูปที่ 77 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.1I_n \leq I \leq I_{max}$ P.F. 0.5 นำหน้าเฟส L_2	79
รูปที่ 78 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.1I_n \leq I \leq I_{max}$ P.F. 0.5 นำหน้าเฟส L_3	79
รูปที่ 79 การตั้งค่าพารามิเตอร์การเชื่อมต่อ ISO Connection Parameters	80
รูปที่ 80 ซอฟต์แวร์ IED Explorer สามารถเชื่อมต่อการสื่อสารกับ Server ได้	81
รูปที่ 81 ซอฟต์แวร์ IED Explorer ไม่สามารถเชื่อมต่อการสื่อสารกับ Server	81
รูปที่ 82 ชุดข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 ของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ในมุมมองของ ledTreeView	82
รูปที่ 83 ชุดข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 ของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ในมุมมองของ ledDataView	83

บทที่ 1

บทนำ

เนื้อหาของบทนี้ จะนำเสนอที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

โครงข่ายไฟฟ้าของประเทศไทยที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันมีการใช้งานมาอย่างยาวนาน โดยโครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายแบบดั้งเดิมนั้น ถูกออกแบบให้มีการเชื่อมต่อกับแหล่งผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่แบบรวมศูนย์และมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านโครงข่ายไฟฟ้าในทิศทางเดียว โดยมีการติดตามและควบคุมที่เป็นไปอย่างจำกัด ส่งผลให้โครงข่ายไฟฟ้าในปัจจุบันมีข้อจำกัดในการตอบสนองต่อจุดประสงค์การพัฒนาจากประเด็นความท้าทายด้านพลังงานไฟฟ้าของประเทศ อาทิเช่น ความมั่นคงด้านพลังงานไฟฟ้า การเสื่อมอายุของอุปกรณ์ในโครงข่ายไฟฟ้า และความไม่แน่นอนของแหล่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน รวมถึงความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) จำเป็นต้องมีการปรับปรุงโครงข่ายไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยการนำเทคโนโลยีต่าง ๆ เข้ามานับสนุนหรือที่เรียกว่าโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (Smart Grid) เป็นโครงข่ายอัจฉริยะของประเทศ ด้วยศักยภาพของระบบเทคโนโลยีสารสนเทศและสื่อสารในปัจจุบัน ทำให้โครงข่ายไฟฟ้าแบบดั้งเดิมสามารถพัฒนาเพื่อเปลี่ยนแปลงเป็นโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะได้ โดยการนำเอาเทคโนโลยีสารสนเทศและสื่อสารเข้ามาช่วยตรวจวัด ควบคุม ระบบโครงข่ายไฟฟ้า จะทำให้โครงข่ายไฟฟ้าเป็นระบบอัตโนมัติมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม การพัฒนาโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะจะต้องเป็นมาตรฐานสากล เพื่อให้มั่นใจว่าเทคโนโลยีที่ถูกนำมาใช้ในการพัฒนานั้น สามารถทำงานร่วมกันและแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกันได้ (Interoperability and Interchangeability) [1]

มาตรฐาน IEC61850 นิยมใช้งานอย่างแพร่หลายในสถานีไฟฟ้า เพื่อพัฒนาให้เป็นระบบสถานีไฟฟ้าอัตโนมัติ (Substation Automation System ; SAS) โดยมีจุดเด่นในการทำงานร่วมกันได้ของ Multi-vender และการสื่อสารด้วยความเร็วสูงระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะ (Intelligent Electronic Device ; IED) วิทยานิพนธ์นี้จึงได้ประยุกต์นำเอามาตรฐาน IEC61850 มาใช้กับระดับของระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ซึ่งเป็นระดับล่างถัดจากสถานีไฟฟ้า เพื่อเป็นแนวทางให้อุปกรณ์ในโครงข่ายไฟฟ้าทำงานร่วมกันและแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกันได้

มากขึ้น เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญยิ่ง และมีติดตั้งใช้งานอยู่ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเป็นจำนวนมาก ซึ่งปัจจุบันยังไม่มีระบบเฝ้าสังเกตการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย เมื่อเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าขัดข้องอันมีสาเหตุมาจากหม้อแปลงไฟฟ้า จะเกิดผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าเป็นบริเวณกว้าง อีกทั้งการตรวจวัดการจ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละเครื่องนั้น โดยปกติทำได้ด้วยวิธีส่งพนักงานออกไปดำเนินการ ซึ่งจะได้ข้อมูลการตรวจสอบเพียงเฉพาะบางเวลา ไม่ต่อเนื่อง ทำให้ไม่สามารถติดตามสภาวะการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ดังนั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอแนวทางการพัฒนาอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายและการส่งข้อมูลการเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายตามมาตรฐาน IEC61850 ซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการรับส่งข้อมูลสูง ผ่านเครือข่าย NB-IoT ที่มีแถบความกว้างข้อมูลต่ำ เพื่อตรวจสอบสภาวะการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1.2.1) พัฒนาอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ระบบ 22 kV 3 เฟส 4 สาย 400/230 V ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

1.2.2) ศึกษาแนวทางการพัฒนาการสื่อสารข้อมูลการเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายตามมาตรฐาน IEC61850 ซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการรับส่งข้อมูลสูง ผ่านเครือข่าย NB-IoT ที่มีแถบความกว้างข้อมูลต่ำ

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.3.1) อุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ระบบ 22 kV 3 เฟส 4 สาย 400/230 V ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

- แรงดันไฟฟ้า (Voltage)
- กระแสไฟฟ้า (Current)
- กำลังไฟฟ้าจริง (Real Power)
- กำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Reactive Power)
- กำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent Power)
- ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor)
- ค่าพลังงานไฟฟ้า (Energy)

- อุณหภูมิครีระบายความร้อนด้านบน (Top Fin Temperature)
- อุณหภูมิครีระบายความร้อนด้านล่าง (Bottom Fin Temperature)

1.3.2) การตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า พิเคราะห์เฉพาะด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย

1.3.3) การพัฒนาเซิร์ฟเวอร์ที่รองรับการลดขนาดข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 สำหรับใช้ในงานวิจัยนี้เท่านั้น

1.3.4) ทดสอบการสื่อสารข้อมูลที่เป็นไปตามมาตรฐาน IEC61850 ในงานวิจัยนี้ โดยใช้ซอฟต์แวร์ IED Explorer เท่านั้น

1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน

- 1.4.1) ศึกษาที่มาและความสำคัญของปัญหา
- 1.4.2) กำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย
- 1.4.3) ศึกษางานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย
- 1.4.4) ศึกษาความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย
- 1.4.5) ศึกษาและทดลองใช้งานบอร์ดมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 เพื่อนำมาวัดค่าทางไฟฟ้าด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ระบบ 22 kV 3 เฟส 4 สาย 400/230 V
- 1.4.6) ศึกษาและทดลองใช้งานเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิชนิดป้องกันน้ำ DS18B20 เพื่อนำมาวัดค่าอุณหภูมิครีระบายความร้อนด้านบนและด้านล่างของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ระบบ 22 kV 3 เฟส 4 สาย 400/230 V
- 1.4.7) ศึกษาวิธีการนำข้อมูลที่ได้จากบอร์ดมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 และเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิชนิดป้องกันน้ำ DS18B20 มาสร้างชุดข้อมูลการเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายตามมาตรฐาน IEC61850
- 1.4.8) ออกแบบการ Mapping ข้อมูลมาตรฐาน IEC61850 ให้เป็นรายงานข้อมูล MMS ตามมาตรฐาน ASN.1
- 1.4.9) ศึกษาข้อจำกัดการส่งข้อมูลการเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายตามมาตรฐาน IEC61850 ผ่านเครือข่าย NB-IoT
- 1.4.10) ศึกษาและทดลองใช้งานบอร์ด BeagleBone Black เพื่อใช้เป็นศูนย์ข้อมูลของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย

1.4.11) ทดสอบการสื่อสารข้อมูลกับซอฟต์แวร์ IED Explorer ที่ทำหน้าที่เป็น Client เรียกอ่านชุดข้อมูล MMS ที่พัฒนาขึ้น เพื่อตรวจสอบว่าอุปกรณ์ทั้งสองสามารถทำงานร่วมกันได้และชุดข้อมูลที่พัฒนาขึ้นเป็นไปตามมาตรฐาน IEC61850

1.4.12) ปรับปรุงและแก้ไขข้อผิดพลาดจากการทดสอบงานวิจัย

1.4.13) วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบของงานวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1) อุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ระบบ 22 kV 3 เฟส 4 สาย 400/230 V ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

1.5.2) กระบวนการสื่อสารข้อมูลการเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายตามมาตรฐาน IEC61850 ซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการรับส่งข้อมูลสูง ผ่านเครือข่าย NB-IoT ที่มีแถบความกว้างข้อมูลต่ำ

1.6 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถแบ่งได้เป็น 4 หัวข้อหลัก คือ 1) ระบบเฝ้าสังเกตการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า 2) ระบบเฝ้าสังเกตการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีจำหน่าย 3) มาตรฐาน IEC61850 และ 4) เทคโนโลยี Narrowband IoT (NB-IoT) ดังนี้

1.6.1) ระบบเฝ้าสังเกตการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า

งานวิจัยใน [2] กล่าวถึงการติดตั้งและการทำงานของระบบตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ประกอบด้วยหน่วยควบคุมหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังภาคพื้นดินและ server ของระบบตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง เครือข่ายการสื่อสารถูกสร้างขึ้นโดยใช้การเชื่อมโยงผ่านใยแก้วนำแสง ในส่วนของการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างหน่วยควบคุม server และ SCADA เกิดขึ้นผ่านโปรโตคอลการสื่อสารต่าง ๆ สำหรับความต้องการของลูกค้าที่แตกต่างกันไป เช่น IEC61850, IEC60870-5-101/103, IEC60870-5-104, DNP3.0 หรืออื่น ๆ โดยสามารถเข้าถึงข้อมูลแบบออนไลน์เพื่อแสดงค่าของก๊าซและความชื้น รวมถึงการเปลี่ยนแปลงระดับสีของก๊าซและความชื้นในช่วงระยะเวลาตามการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้า นอกจากนี้ค่าที่ได้จากการวัด หากเกินค่าเกณฑ์ที่ตั้งไว้ ระบบตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจะส่งสัญญาณแจ้งเตือน อีกทั้งยังสามารถแสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังออกเป็นตารางและแผนภูมิได้อีกด้วย งานวิจัยใน [3] กล่าวถึง การพัฒนาต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายตามมาตรฐาน IEC61850 ซึ่งเป็นมาตรฐานการสื่อสารใน

โครงข่ายไฟฟ้าสมัยใหม่ ที่จะเพิ่มสมรรถนะของอุปกรณ์ให้สามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลกับอุปกรณ์อื่นในโครงข่ายไฟฟ้าได้ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและจัดการข้อมูลอย่างมีระบบ โดยสามารถเฝ้าสังเกตการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย อีกทั้งยังสามารถประมวลผลจำแนกประเภทความผิดปกติของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายได้

สรุป : วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำแนวคิดของงานวิจัยดังกล่าวมาปรับปรุงการพัฒนาอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย โดยตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ระบบ 22 kV 3 เฟส 4 สาย 400/230 V ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคตามที่ระบุไว้ในขอบเขตของวิทยานิพนธ์ และพัฒนากระบวนการส่งข้อมูลการเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายตามมาตรฐาน IEC61850 ผ่านเครือข่าย NB-IoT

1.6.2) ระบบเฝ้าสังเกตการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีจำหน่าย

[4] บริษัท คิวทีซี เอนเนอร์ยี จำกัด (มหาชน) ได้พัฒนาหม้อแปลงไฟฟ้าอัจฉริยะที่สามารถตรวจวัด จัดเก็บและแสดงผลสถานะการใช้งานผ่านระบบอินเทอร์เน็ตได้แบบทันที (Real time) โดยข้อมูลนี้จะถูกจัดเก็บไว้บนคลาวด์ ผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบย้อนหลังได้ตลอดเวลา รวมถึงแจ้งเตือนสิ่งผิดปกติให้ผู้ใช้งานทราบผ่านทาง Email, Line Application ได้ก่อนที่จะเกิดความเสียหายต่อหม้อแปลงไฟฟ้า [5] บริษัท เจริญชัยหม้อแปลงไฟฟ้า จำกัด ได้พัฒนาอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสถานะของหม้อแปลงไฟฟ้า เช่น ค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้า หรือค่าอื่น ๆ แล้วส่งข้อมูลที่ไ้จากการวัดไปยัง Cloud Server ผ่านระบบอินเทอร์เน็ต ซึ่งสามารถเลือกวิธีการส่งข้อมูลได้หลายรูปแบบ เช่น 3G/4G, Fiber Optic หรือวิธีการส่งข้อมูลแบบอื่น ๆ ตามที่ผู้ใช้งานต้องการ [6] Secure Meters Ltd. ได้พัฒนามิเตอร์สำหรับเฝ้าสังเกตการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ซึ่งติดตั้งประกอบกับหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าด้านแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยมีความสามารถทำงานร่วมกันได้บนโพรโตคอล DLMS ผ่านเครือข่าย GSM/GPRS

สรุป : ระบบเฝ้าสังเกตการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีจำหน่ายดังกล่าว ยังไม่ได้ดำเนินการส่งข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 ผ่านเครือข่าย NB-IoT ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำแนวคิดของระบบเฝ้าสังเกตการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีจำหน่ายดังกล่าว มาปรับปรุงเป็นอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ระบบ 22 kV 3 เฟส 4 สาย 400/230 V ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่มีติดตั้งใช้งานปัจจุบัน และพัฒนากระบวนการส่งข้อมูลการเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายตามมาตรฐาน IEC61850 ผ่านเครือข่าย NB-IoT

1.6.3) มาตรฐาน IEC61850

มาตรฐาน IEC61850 [7] นิยมใช้งานอย่างแพร่หลายในสถานีไฟฟ้า เพื่อพัฒนาให้เป็นระบบสถานีไฟฟ้าอัตโนมัติ โดยมีจุดเด่นในการทำงานร่วมกันได้ของ Multi-vender และการสื่อสารด้วยความเร็วสูงระหว่าง IED โดยแนวคิดของมาตรฐาน IEC61850 นั้นจะจำลองอุปกรณ์จริงให้เป็นแบบจำลองเสมือนจริงเรียกว่า Logical Device ซึ่งมี Logical Node กำหนดฟังก์ชันที่สอดคล้องกับฟังก์ชันการทำงานของอุปกรณ์จริง งานวิจัยใน [8] อธิบายถึงระบบสถานีไฟฟ้าอัตโนมัติตามมาตรฐาน IEC 61850 ที่มีฟังก์ชันการตรวจสอบสังเกตการณ์ การควบคุม การบันทึก และการป้องกัน

สรุป : วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ประยุกต์นำเอามาตรฐาน IEC61850 มาใช้กับระดับของระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ซึ่งเป็นระดับล่างถัดจากสถานีไฟฟ้า เพื่อเป็นแนวทางให้อุปกรณ์ในโครงข่ายไฟฟ้าทำงานร่วมกันและแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกันได้มากขึ้น

1.6.4) เทคโนโลยี Narrowband IoT (NB-IoT)

งานวิจัยใน [9] กล่าวถึง Narrowband IoT (NB-IoT) กับการใช้งานในโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ พร้อมเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีการสื่อสารที่มีอยู่เดิมในบริบทของอัตราการส่งข้อมูล latency และระยะทางการสื่อสารข้อมูล นอกจากนี้ NB-IoT ยังมีประสิทธิภาพในการสื่อสารข้อมูลตามสภาพแวดล้อมทั้งในเขตเมืองและพื้นที่ห่างไกลได้เป็นอย่างดี

สรุป : วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เล็งเห็นถึงจุดสำคัญที่ต้องพิจารณาคือ NB-IoT ต้องมีความสามารถส่งข้อความข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 ได้

1.7 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ แบ่งออกเป็น 7 บท โดยมีเนื้อหา ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ จะกล่าวถึง ที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 ทฤษฎีและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง จะกล่าวถึง ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์โดยรวม ประกอบด้วย ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ไอซีวีตพลังงานไฟฟ้า STPM34 เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิชนิดป้องกันน้ำ DS18B20 บอร์ด Devio NB-Devkit I บอร์ด BeagleBone Black เทคโนโลยี Narrowband IoT (NB-IoT) และมาตรฐาน IEC61850

บทที่ 3 การออกแบบอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT จะกล่าวถึง การออกแบบอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT การออกแบบ Schematic ของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT การออกแบบลายวงจรพิมพ์สำหรับอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT และการพัฒนาอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT

บทที่ 4 การออกแบบชุดข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 จะกล่าวถึง การออกแบบและพัฒนาชุดข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850

บทที่ 5 การออกแบบซอฟต์แวร์ของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายตามมาตรฐาน IEC61850 ผ่านเครือข่าย NB-IoT จะกล่าวถึง การออกแบบซอฟต์แวร์ภาคการวัด และการออกแบบซอฟต์แวร์ส่วน Server

บทที่ 6 การทดสอบและผลการทดสอบ จะกล่าวถึง การทดสอบและผลการทดสอบการวัดของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT และการทดสอบและผลการทดสอบชุดข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850

บทที่ 7 บทสรุปผลงานวิจัย จะกล่าวถึง บทสรุปของงานวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับ และข้อเสนอแนะของงานวิจัยเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงงานวิจัยนี้ต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะอธิบายถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์โดยรวม โดยเนื้อหาในบทนี้จะแบ่งออกเป็น 7 หัวข้อดังนี้

- 2.1 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
- 2.2 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์พลังงานไฟฟ้า STPM34
- 2.3 เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิชนิดป้องกันน้ำ DS18B20
- 2.4 บอร์ด Devio NB-Devkit I
- 2.5 บอร์ด BeagleBone Black
- 2.6 เทคโนโลยี Narrowband IoT (NB-IoT)
- 2.7 มาตรฐาน IEC61850

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) คือ เครื่องกลไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ใช้ในการส่งถ่ายพลังงานไฟฟ้าจากวงจรหนึ่งไปยังอีกวงจรหนึ่งโดยอาศัยหลักการของแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านขดลวดและแกนเหล็ก โดยพลังงานไฟฟ้าจะถ่ายเทจากขดลวดด้านจ่ายไฟเข้าหม้อแปลงไฟฟ้าหรือขดลวดปฐมภูมิ (Primary Winding) และจ่ายไฟออกผ่านขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Winding) หม้อแปลงไฟฟ้านิยมใช้เชื่อมโยงระหว่างระบบไฟฟ้าที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าต่างกัน โดยจะทำหน้าที่เพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมกับการส่งจ่ายและการใช้ไฟฟ้าโดยความถี่ไม่เปลี่ยนแปลง

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์หลักในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบไฟฟ้านั้นมีอยู่หลายชนิด เช่น หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Power Transformer) หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย (Distribution Transformer) และหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับเครื่องมือวัด (Instrument Transformer) ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะกล่าวถึงเฉพาะหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย (Distribution Transformer) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าจากระบบแรงดันไฟฟ้าปานกลาง (Medium Voltage) คือระดับแรงดันไฟฟ้า 22 kV และ 33 kV เป็นระดับแรงดันต่ำ (Low Voltage) 400/230 V

โดยปัจจุบัน การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค มีขนาดหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ระบบ 22 kV และ 33 kV ดังนี้

- หม้อแปลงไฟฟ้าระบบ 1 เฟส ขนาดกำลังไฟฟ้า 10, 20, 30 และ 50 kVA
- หม้อแปลงไฟฟ้าระบบ 3 เฟส ขนาดกำลังไฟฟ้า 50, 100, 160, 250, 315, 400, 500, 630, 1,000, 1,250, 1,500 และ 2,000 kVA



รูปที่ 1 หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

2.1.1 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้ามีส่วนประกอบหลักที่สำคัญอยู่ 3 ส่วน คือ ขดลวดตัวนำ (Winding) แกนเหล็ก (Core) และฉนวน (Insulation) ซึ่งอาจมีส่วนประกอบย่อยอื่น ๆ เช่น ถังน้ำมัน ชุดเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้า อุปกรณ์ลดความดัน ชุดกรองความชื้น ถังพักน้ำมัน ลูกถ้วยต้านแรงสูง-แรงต่ำ เป็นต้น

ขดลวดตัวนำ (Winding) หม้อแปลงไฟฟ้ามีขดลวด 2 ชุด คือ ขดลวดปฐมภูมิ (Primary Winding) ทำหน้าที่เป็นชุดรับไฟเข้า และขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Winding) ทำหน้าที่เป็นชุดจ่ายไฟออก ขดลวดตัวนำของหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีลักษณะเป็นขดลวดทองแดง หรืออลูมิเนียมหุ้มด้วยฉนวน

แกนเหล็ก (Core) ทำหน้าที่เป็นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กและให้ขดลวดตัวนำพันรอบแกนเหล็ก แกนเหล็กมีลักษณะเป็นแผ่นเหล็กบาง ๆ นำมาตัดออกเป็นมุม 45 องศา เคลือบด้วยฉนวนที่มีค่าความเป็นฉนวนตามผิวสูง นำมาอัดเรียงซ้อนกันประกอบขึ้นเป็นรูปแกนของหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อให้ได้การสูญเสียเนื่องจากแกนเหล็ก (Core Loss) ต่ำ และเพื่อป้องกันการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy Current) ลักษณะของแกนเหล็กที่ดีจะต้องมีความซึมซาบได้สูง การสูญเสียเนื่องจากฮีสเทอรีซิสต่ำ

ฉนวน (Insulation) ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ขดลวดตัวนำสัมผัสกับส่วนที่เป็นแกนเหล็ก ป้องกันไม่ให้ขดลวดตัวนำแต่ละชั้นสัมผัสกัน และช่วยระบายความร้อนจากขดลวดตัวนำและแกนเหล็ก โดยวัสดุที่นิยมใช้เป็นฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้า ได้แก่ กระดาษฉนวน กระดาษอัดแข็ง วานิช อีพ็อกซี พอร์ซเลน หรือน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นต้น

2.1.2 ชนิดของหม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายที่ใช้งานในปัจจุบัน สามารถจำแนกออกได้ 2 ชนิด ดังนี้

จำแนกตามชนิดของฉนวน

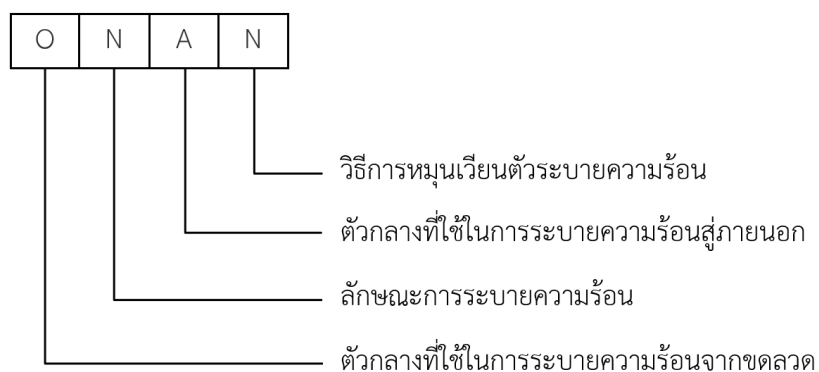
- หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดฉนวนแห้ง (Dry Type Transformer) หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดนี้นิยมใช้ติดตั้งภายในอาคาร เนื่องจากมีความปลอดภัยจากเพลิงไหม้สูง เพราะหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดนี้ใช้ฉนวนเป็นของแข็งประเภทสารเรซินหล่อหุ้มขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งมีคุณสมบัติคงทนต่อไฟไหม้ได้ดี หากหม้อแปลงไฟฟ้าเกิดการระเบิดจะไม่มีส่วนใดของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ติดไฟ
- หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดฉนวนเหลว (Liquid Immersed Type Transformer) เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ฉนวนเหลว ซึ่งคุณสมบัติของฉนวนและตัวกลางในการระบายความร้อนสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดฉนวนเหลวติดไฟได้ (Flammable Liquid Insulated Transformer) หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดฉนวนเหลวติดไฟยาก (Less Flammable Liquid Insulated Transformer) และหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดฉนวนเหลวไม่ติดไฟ (Non Flammable Liquid Insulated Transformer)

จำแนกตามโครงสร้างของแกนเหล็ก

- หม้อแปลงไฟฟ้าชนิด Core Type เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีวงจรมแม่เหล็กแบบวงจรรูปวงรี โดยขดลวดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิพันอยู่บนแกนเหล็กทั้งสองด้านแยกกันอยู่คนละข้าง ทำให้สามารถระบายความร้อนออกจากขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าได้ดี
- หม้อแปลงไฟฟ้าชนิด Shell Type เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีวงจรมแม่เหล็กแบบวงจรรูปตัว E โดยขดลวดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิพันอยู่บนแกนกลางของแกนเหล็กทั้งสองและพันทับกันอยู่ ทำให้ไม่สามารถระบายความร้อนออกจากขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าได้ดี เนื่องจากขดลวดถูกล้อมด้วยแกนเหล็ก

2.1.3 การระบายความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้า

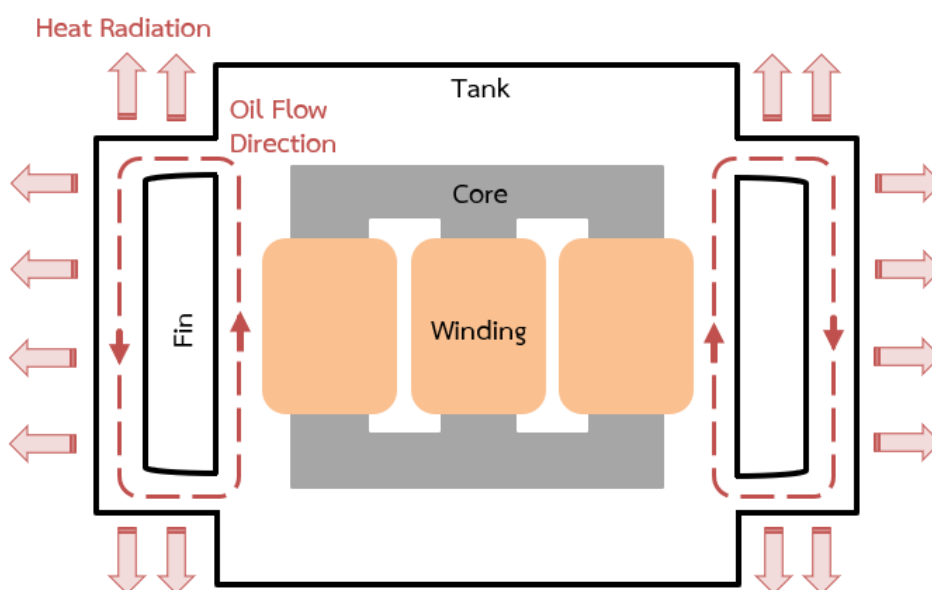
หม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อใช้งานไปแล้วจะเกิดความร้อนและค่าความสูญเสียภายในหม้อแปลง จะทำให้หม้อแปลงไฟฟ้ามีอายุการใช้งานที่สั้นลงหรือหม้อแปลงไฟฟ้าอาจชำรุดได้ จึงจำเป็นต้องมีการระบายความร้อนออกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน อันจะทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าสามารถจ่ายโหลดได้เพิ่มขึ้น การระบายความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นการระบายความร้อนจากขดลวดตัวนำมาที่ตัวถังหม้อแปลงไฟฟ้า โดยอาศัยฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นตัวกลางในการระบายความร้อน โดยการระบายความร้อนออกจากตัวถังหม้อแปลงไฟฟ้าสู่ภายนอกนั้นมีหลายวิธีและใช้สัญลักษณ์แสดงวิธีการระบายความร้อน ตามที่ระบุไว้ในแผ่นป้ายหม้อแปลงไฟฟ้า (Name Plate) ซึ่งจะเขียนเป็นตัวอักษรภาษาอังกฤษ 2 ตัว หรือ 4 ตัว



รูปที่ 2 สัญลักษณ์แสดงวิธีการระบายความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้า

วิธีการระบายความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้า แสดงตัวอย่างดังนี้

- AF (Air Forced) : หม้อแปลงชนิดแห้งระบายความร้อนด้วยวิธีอัดอากาศ
- AN (Air Natural) : หม้อแปลงชนิดแห้งระบายความร้อนด้วยวิธีหมุนเวียนอากาศตามธรรมชาติ
- ONAF (Oil Natural Air Forced) : หม้อแปลงชนิดฉนวนน้ำมันระบายความร้อนด้วยวิธีอัดอากาศ
- ONAN (Oil Natural Air Natural) : หม้อแปลงชนิดฉนวนน้ำมันระบายความร้อนด้วยวิธีหมุนเวียนอากาศตามธรรมชาติ
- OFAF (Oil Forced Air Forced) : หม้อแปลงชนิดฉนวนน้ำมันระบายความร้อนด้วยวิธีอัดน้ำมันและอัดอากาศ
- OFWF (Oil Forced Water Forced) : หม้อแปลงชนิดฉนวนน้ำมันระบายความร้อนด้วยวิธีอัดน้ำมันและอัดน้ำ



รูปที่ 3 วิธีการระบายความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ ONAN

วิธีการระบายความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ ONAN ใช้สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดฉนวนเหลวแบบแช่น้ำมัน โดยวัฏจักรการระบายความร้อนเกิดขึ้นเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลด จะเกิดความร้อนขึ้นที่ขดลวดตัวนำซึ่งแช่ฉนวนน้ำมันอยู่ในตัวถังหม้อแปลงไฟฟ้า น้ำมันซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนและตัวกลางในการระบายความร้อนจึงมีอุณหภูมิสูงขึ้นและมีทิศทางไหลขึ้นสู่ด้านบนของตัวถังและดันออกผ่านช่องว่างของครีบริบายความร้อน

บริเวณนี้เองที่ทำให้น้ำมันถูกบรรยากาศภายนอกดึงเอาความร้อนออกในลักษณะการนำพาความร้อนออกสู่บรรยากาศภายนอกตามธรรมชาติ จึงทำให้น้ำมันมีอุณหภูมิลดลงและมีทิศทางไหลลงสู่ด้านล่างของตัวถังแทนที่น้ำมันอุณหภูมิสูงที่ลอยตัวอยู่ด้านบนต่อไป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เล็งเห็นถึงคุณสมบัติของการระบายความร้อนที่เรียบง่ายของวิธีการระบายความร้อนหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ ONAN อีกทั้งยังเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการระบายความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยจุดสังเกตที่ชัดเจนสำหรับการระบายความร้อนวิธีนี้ คือ ขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้ามีการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่โหลด อุณหภูมิที่ตำแหน่งครีระบายความร้อนด้านบนย่อมมีค่าสูงกว่าด้านล่าง จึงเหมาะที่จะใช้เป็นตำแหน่งติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อตรวจสอบสภาวะการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดต่อไปในหัวข้อ 2.3

2.1.4 กำลังไฟฟ้าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้า

กำลังไฟฟ้าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยทั่วไปจำแนกออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด (No-Load Loss) และกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลด (Load Loss)

กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด (No-Load Loss) เกิดขึ้นเนื่องจากการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้หม้อแปลงไฟฟ้าที่แรงดันพิกัด โดยขดลวดตัวนำด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าถูกเปิดวงจรไว้หรือไม่ได้จ่ายโหลด กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลดนั้นมีค่าคงที่ที่แรงดันพิกัดและความถี่พิกัด ซึ่งจำแนกได้เป็น 2 ส่วน คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss) และกำลังไฟฟ้าสูญเสียปรากฏ (Apparent Loss) โดยที่กำลังไฟฟ้าสูญเสียในส่วน Core Loss สามารถแยกออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจาก Eddy Current Core Loss และ Hysteresis Loss สำหรับกำลังไฟฟ้าสูญเสียในส่วน Apparent Loss นั้นเกิดขึ้นเนื่องจากกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (Magnetizing Current) ไหลผ่านความต้านทานขดลวดตัวนำด้านปฐมภูมิ จึงเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในเชิงความร้อนขึ้น (I^2R)

กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลด (Load Loss) เกิดขึ้นเนื่องจากการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าหรือเมื่อต่อโหลดเข้ากับขดลวดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งจำแนกได้เป็น 2 ส่วน คือ Copper Loss และ Stray Loss โดยที่กำลังไฟฟ้าสูญเสียในส่วน Copper Loss เกิดขึ้นขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลด จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านค่าความต้านทานขดลวด จึงเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในเชิงความร้อนขึ้น (I^2R) ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย Copper Loss จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานจำเพาะ ขนาดพื้นที่หน้าตัดของวัสดุที่เลือกใช้ และจำนวนรอบที่ใช้ในการพันขดลวด บางโอกาสอาจเรียก Copper Loss นี้ว่า Winding Loss เนื่องจากวัสดุที่นำมาใช้เป็นขดลวดตัวนำของหม้อแปลงไฟฟ้าส่วนใหญ่ทำมาจากทองแดง สำหรับกำลังไฟฟ้าสูญเสีย Stray Loss นั้นเกิดขึ้นเนื่องจากปรากฏการณ์ภายในของหม้อแปลงไฟฟ้าเอง สามารถแยกออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ Stray Capacitance และ Leakage Inductance ซึ่งจะมีผลทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าลดลง เหตุผลเนื่องมาจากมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมอิมพีแดนซ์เหล่านี้้อยู่ค่าหนึ่ง

เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ต้องต่อเชื่อมโยงอยู่ในระบบไฟฟ้าตลอดเวลา ดังนั้นหากสามารถลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของหม้อแปลงลงได้ ก็จะสามารถลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียทางเทคนิค (Technical Loss) ของระบบไฟฟ้าลงได้ โดยปัจจุบันการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้กำหนดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของหม้อแปลงไฟระบบจำหน่าย ทั้งกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด (No-Load Loss) และกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลด (Load Loss) ดังนี้

ตารางที่ 1 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบ 1 เฟส

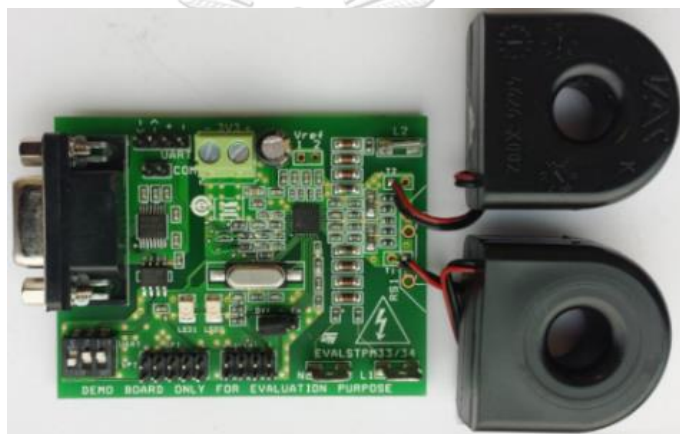
ขนาดหม้อแปลงไฟฟ้า (kVA)	กำลังไฟฟ้าสูญเสีย (Watt)	
	No-Load Loss ระบบ 22 kV และ 33 kV	Load Loss (ที่อุณหภูมิ 75 °C)
10	60	145
20	90	300
30	120	430
50	150	670

ตารางที่ 2 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบ 3 เฟส

ขนาดหม้อแปลงไฟฟ้า (kVA)	กำลังไฟฟ้าสูญเสีย (Watt)		
	No-Load Loss		Load Loss (ที่อุณหภูมิ 75 °C)
	ระบบ 22 kV	ระบบ 33 kV	
50	160	170	950
100	250	260	1,550
160	360	370	2,100
250	500	520	2,950
315	600	630	3,500
400	720	750	4,150
500	860	900	4,950
630	1,010	1,050	5,850
1,000	1,270	1,300	12,150
1,250	1,500	1,530	14,750
1,500	1,820	1,850	17,850
2,000	2,110	2,140	21,600

2.2 ไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34

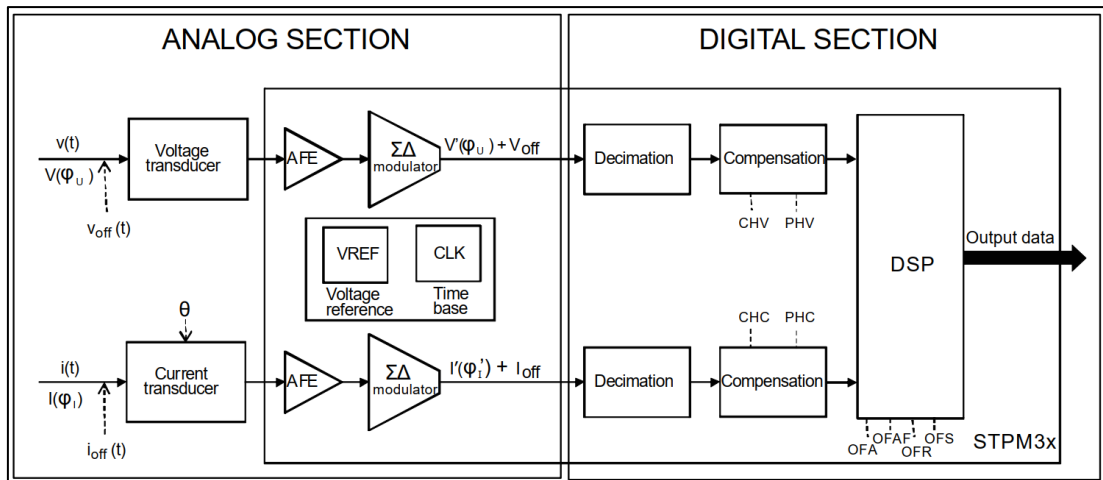
ไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 [10] มีความสามารถวัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าแบบทันทีทันใด แล้วคำนวณเป็นค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพ กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟฟารีแอกทีฟ กำลังไฟฟ้าปรากฏ และพลังงานไฟฟ้า นอกจากนี้ ภายในไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 ยังมีชุดพารามิเตอร์การสอบเทียบและชดเชยค่าการคำนวณอย่างครบถ้วน ทำให้ได้ผลการคำนวณตามมาตรฐานความแม่นยำ เช่น EN 50470-x, IEC 62053-2x และ ANSI12.2x for AC watt meter เป็นต้น โดยข้อมูลที่คำนวณได้รวมถึงพารามิเตอร์ configuration จะถูกเก็บไว้ในรีจิสเตอร์ขนาด 32 บิตที่สามารถเข้าถึงได้ผ่านโปรโตคอลการสื่อสารแบบ SPI (Serial Peripheral Interface) หรือ UART (Universal Asynchronous Receiver and Transmitter) ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 [10]

2.2.1 หลักการทำงานของไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34

การทำงานของส่วนมาตรวิทยาของไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 นั้น [11] ประกอบด้วย ส่วนแอนะล็อก และส่วนดิจิทัล โดยส่วนแอนะล็อกทำหน้าที่วัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าแล้วแปลงค่าการวัดแบบแอนะล็อกให้เป็นค่าแบบดิจิทัลที่มีความละเอียดสูง จากนั้นทำการส่งต่อค่าการวัดให้ส่วนดิจิทัล ซึ่งประกอบด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลที่มีประสิทธิภาพในการวัดค่าทางไฟฟ้าสูง ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 หลักการวัดพลังงานไฟฟ้าของไอซี STPM34 [11]

ในส่วนแอนะล็อกนั้น ประกอบด้วยตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล ที่ทำหน้าที่เก็บค่าแรงดันเฟสและกระแสเฟสที่ทำการวัดอยู่พร้อมกัน หรือในขณะสัญญาณนาฬิกาเดียวกัน โดยผลลัพธ์ของการทำงานในส่วนอะแนล็อกจะเป็นค่าดิจิทัลของแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่มีความสัมพันธ์ทางเวลาที่แม่นยำ

ในส่วนดิจิทัลนั้น ประกอบด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ที่ทำหน้าที่คำนวณค่าของแรงดันและกระแสไฟฟ้าแบบเวลาจริงให้เป็นค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าประสิทธิผล กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟารีแอกทีฟ กำลังไฟฟ้าปรากฏ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้า โดยค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าทุกค่าจะถูกคำนวณตามสมการทางคณิตศาสตร์ไฟฟ้า ซึ่งข้อมูลที่คำนวณได้จะถูกเก็บไว้ในรีจิสเตอร์ขนาด 32 บิต ที่สามารถเข้าถึงได้ผ่านโปรโตคอลการสื่อสารแบบ SPI หรือ UART เพื่อให้ชุดหน่วยประมวลผลกลางสามารถอ่านข้อมูลการวัดพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าต่อไป

สมการทางคณิตศาสตร์ไฟฟ้าที่ใช้ในการคำนวณเบื้องต้น แสดงดังต่อไปนี้

กำลังไฟฟ้าจริง (Active Power)

$$P = V \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (1)$$

กำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent Power)

$$S = V \cdot I \quad (2)$$

กำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Reactive Power)

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = V \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (3)$$

ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor)

$$PF = \cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (4)$$

เมื่อ V = ค่าแรงดันไฟฟ้าประสิทธิผล

I = ค่ากระแสไฟฟ้าประสิทธิผล

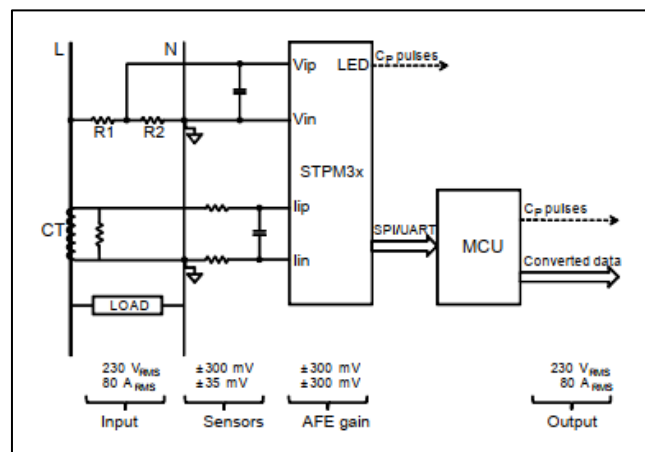
φ = มุมต่างเฟสระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเฟสเดียวกัน

φ_v = มุมเฟสของแรงดันไฟฟ้า

φ_i = มุมเฟสของกระแสไฟฟ้า

2.2.2 ระบบการวัดพลังงานไฟฟ้าของไอซี STPM34

ระบบการวัดพลังงานไฟฟ้าของไอซี STPM34 [11] ก่อนอื่นต้องกำหนดย่านการวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ต้องการ เพื่อที่จะได้ออกแบบวงจรระดับแรงดันและกระแสไฟฟ้าป้อนเข้าไอซี STPM34 ได้อย่างเหมาะสม อันประกอบด้วย วงจรลดทอนแรงดันและวงจรถอดทอนกระแส ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ระบบการวัดพลังงานไฟฟ้าของไอซี STPM34 [11]

วงจรถอดทอนแรงดันไฟฟ้า ประกอบด้วยตัวต้านทาน R_1 และ R_2 ที่ต่อกันเป็นวงจรถัดตัวต้านทานแบ่งแรงดันไฟฟ้า ทำหน้าที่ปรับลดขนาดแรงดันไฟฟ้าเฟสให้พอดีกับตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลของไอซี STPM34 และอีกสิ่งหนึ่งที่สำคัญที่จำเป็นต้องทราบคือพารามิเตอร์ภายในของไอซี STPM34 เช่น อัตราการขยายของช่องแรงดันไฟฟ้า โดยจะกำหนดค่าความแตกต่างสูงสุดของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไอซี STPM34 และพารามิเตอร์แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง เพื่อให้สามารถแปลงข้อมูลที่คำนวณในรีจิสเตอร์ขนาด 32 บิตให้เป็นค่าจริงได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ดังแสดงในตารางที่ 3 และตารางที่ 4 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 อัตราการขยายของช่องแรงดันไฟฟ้า (A_v)

Gain	Differential Input
$\times 2$	$\pm 300 \text{ mV}$

ตารางที่ 4 แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของช่องแรงดันไฟฟ้า (V_{REF})

Parameter	Value
Voltage Reference (V_{REF})	1.2 V

ระบบการวัดพลังงานไฟฟ้าของไอซี STPM34 [12] ได้ออกแบบวงจรตัวต้านทานแบ่งแรงดันไฟฟ้า ประกอบด้วยตัวต้านทาน R_1 ที่มีค่า 810 k Ω R_2 มีค่า 470 Ω และกำหนดให้อัตราการขยายของช่องแรงดันไฟฟ้าคือ $\pm V_{REF}/2A_V$ จึงทำให้ได้สมการวงจรวัดแรงดัน ดังนี้

$$V_{MAX_RMS} \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} < \frac{V_{REF}}{2A_V} \quad (5)$$

หรือ

$$V_{MAX_RMS} < \frac{V_{REF} \cdot (R_1 + R_2)}{2\sqrt{2} \cdot A_V \cdot R_2} \quad (6)$$

เมื่อ V_{MAX_RMS} = แรงดันอินพุตประสิทธิภาพสูงสุด

V_{REF} = แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง

A_V = อัตราการขยายของช่องแรงดันไฟฟ้า

R_1 = ตัวต้านทานแบ่งแรงดันไฟฟ้า 810 k Ω

R_2 = ตัวต้านทานแบ่งแรงดันไฟฟ้า 470 Ω

เมื่อทำการแทนค่าตัวแปรลงในสมการที่ (6) เพื่อหาค่าแรงดันอินพุตประสิทธิภาพสูงสุดที่สามารถป้อนให้กับตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลของไอซี STPM34 ทำให้ได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$V_{MAX_RMS} < \frac{1.2V \cdot (810000\Omega + 470\Omega)}{2\sqrt{2} \cdot 2 \cdot 470\Omega}$$

$$V_{MAX_RMS} < 365.80 V$$

ดังนั้น แรงดันอินพุตประสิทธิภาพสูงสุด ที่สามารถป้อนให้กับตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลของไอซี STPM34 คือต้องมีค่าน้อยกว่า 365.80 V_{RMS}

วงจรลดทอนกระแสไฟฟ้า ประกอบด้วยหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า (Current Transformer ; CT) ที่ทำหน้าที่ลดขนาดกระแสไฟฟ้าให้พอดีกับตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลของไอซี STPM34 และอีกสิ่งหนึ่งที่สำคัญที่จำเป็นต้องทราบคือพารามิเตอร์ภายใน

ของไอซี STPM34 เช่น อัตราการขยายของช่องกระแสไฟฟ้า และพารามิเตอร์ความไวของเซ็นเซอร์กระแสไฟฟ้า ดังแสดงในตารางที่ 5 และตารางที่ 6 ตามลำดับ

ตารางที่ 5 อัตราการขยายของช่องกระแสไฟฟ้า (A_I)

Gain	Differential Input
x2	± 300 mV
x4	± 150 mV
x8	± 75 mV
x16	± 37.5 mV

ตารางที่ 6 ความไวของเซ็นเซอร์กระแสไฟฟ้า (K_S)

Parameter	Value
Sensitivity (K_S)	2.4 mV/A

ระบบการวัดพลังงานไฟฟ้าของไอซี STPM34 [12] ได้ออกแบบวงจรลดทอนกระแสไฟฟ้า และกำหนดให้อัตราการขยายของช่องกระแสไฟฟ้าคือ $\pm V_{REF}/2A_I$ จึงทำให้ได้สมการ ดังนี้

$$I_{MAX_RMS} \cdot \sqrt{2} \cdot K_S < \frac{V_{REF}}{2A_I} \quad (7)$$

หรือ

$$I_{MAX_RMS} < \frac{V_{REF}}{2\sqrt{2} \cdot A_I \cdot K_S} \quad (8)$$

เมื่อ I_{MAX_RMS} = กระแสอินพุตประสิทธิภาพสูงสุด

V_{REF} = แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง

A_I = อัตราการขยายของช่องกระแสไฟฟ้า

K_S = ความไวของเซ็นเซอร์กระแสไฟฟ้า

เมื่อทำการแทนค่าตัวแปรลงในสมการที่ (8) เพื่อหาค่ากระแสอินพุตประสิทธิภาพสูงสุดที่สามารถป้อนให้กับตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลของไอซี STPM34 ทำให้ได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$I_{MAX_RMS} < \frac{1.2V}{2\sqrt{2} \cdot 16 \cdot 2.4mV / A}$$

$$I_{MAX_RMS} < 11.04 \text{ A}$$

ดังนั้น กระแสอินพุตประสิทธิภาพสูงสุด ที่สามารถป้อนให้กับตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลของไอซี STPM34 คือต้องมีค่าน้อยกว่า 11.04 A_{RMS}

2.2.3 การแปลงค่าพลังงานไฟฟ้าที่อ่านได้จากรีจิสเตอร์ให้เป็นค่าจริง

ค่าพลังงานที่ไอซี STPM34 วัดและคำนวณได้ จะถูกเก็บไว้ในรีจิสเตอร์ขนาด 32 บิตที่สามารถเข้าถึงได้ผ่านโปรโตคอลการสื่อสารแบบ SPI หรือ UART สำหรับตัวอย่างรีจิสเตอร์ขนาด 32 บิต ที่เก็บข้อมูลแรงดันและกระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 7

Row	Address	(R)ead (W)rite (L)atch	Data							Name
			31:28	27:24	23:20	19:16	15:12	11:8	7:4	
36	48	RL	C1 RMS Data [16:0]				V1 RMS Data [14:0]			dsp_reg14

รูปที่ 7 รีจิสเตอร์ภายในไอซี STPM34 ที่เก็บค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพ [12]

จากรูปที่ 7 แสดงตำแหน่งรีจิสเตอร์ขนาด 32 บิต ที่เก็บข้อมูลแรงดันและกระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพ โดยค่าของไบต์ที่มีนัยสำคัญน้อยที่สุด (Least Significant Byte ; LSB) สำหรับข้อมูลแรงดันไฟฟ้าประสิทธิภาพหรือ V_{RMS} นั้นจะอยู่ที่ตำแหน่งบิตที่ 0 ถึงบิตที่ 14 (15 บิต) ทำให้รีจิสเตอร์ V_{RMS} มีค่าข้อมูลสูงสุดเท่ากับ 2^{15} ส่วนข้อมูลกระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพหรือ I_{RMS} นั้นจะอยู่ที่ตำแหน่งบิตที่ 15 ถึงบิตที่ 31 (17 บิต) ทำให้รีจิสเตอร์ I_{RMS} มีค่าข้อมูลสูงสุดเท่ากับ 2^{17} สำหรับสูตรการแปลงค่าที่อ่านได้จากรีจิสเตอร์ให้เป็นค่าจริงนั้น อ้างอิงสูตรตามรูปที่ 8 และรูปที่ 9 ดังนี้

Parameter	Voltage	Current shunt	Current CT	Current Rogowski coil
Gain	$A_V = 2$	$A_I = 16$	$A_I = 2$	$A_I = 16$
Calibrators ⁽¹⁾	$cal_V = 0.875$	$cal_I = 0.875$		
Sensitivity	$\frac{R_2}{R_1 + R_2} [V/A]$	$k_S = R_{Shunt} [\Omega]$	$k_S = \frac{R_b}{N} [V/A]$	$k_S = k_{RoCoil} [V/A]$
Voltage at channel inputs	$V_{inV} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V [V]$	$V_{inC} = k_S \cdot I [V]$		
Integrator gain (for Rogowski coil sensor only)	-	$k_{int} = 1$	$k_{int} = 0.8155773$	
$\Sigma\Delta$ bitstream ⁽²⁾	$V_{\Delta\Sigma} = V_{inV} \cdot \frac{A_V}{V_{ref}}$	$V_{\Delta\Sigma} = V_{inC} \cdot \frac{A_I}{V_{ref}}$	$V_{\Delta\Sigma} = V_{inC} \cdot \frac{A_I}{V_{ref} \cdot k_{int}}$	
Input active power	$P_{in} = V \cdot I \cdot \cos\phi = V \cdot I [W]$			
Power LSB value	$LSB_P = \frac{P_{pulse}}{2^{29}} \cdot DCIk = \frac{V_{ref}^2 \cdot (1 + R_1/R_2)}{k_{int} \cdot A_V \cdot A_I \cdot k_S \cdot cal_V \cdot cal_I \cdot 2^{28}} [W]$			
Energy LSB value	$LSB_E = \frac{P_{pulse}}{2^{18}} = \frac{V_{ref}^2 \cdot (1 + R_1/R_2)}{3600 \cdot DCIk \cdot k_{int} \cdot A_V \cdot A_I \cdot k_S \cdot cal_V \cdot cal_I \cdot 2^{17}} [Wh]$			

รูปที่ 8 สูตรที่ใช้ในการแปลงค่าจากรีจิสเตอร์ให้เป็นค่าจริง [13]

Parameter	Value
Voltage RMS LSB value	$LSB_{VRMS} = \frac{V_{ref} \cdot (1 + R_1/R_2)}{cal_V \cdot A_V \cdot 2^{15}} [V]$
Current RMS LSB value	$LSB_{IRMS} = \frac{V_{ref}}{cal_I \cdot A_I \cdot 2^{17} \cdot k_S \cdot k_{int}} [A]$

รูปที่ 9 สูตรการแปลงค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพจากรีจิสเตอร์ให้เป็นค่าจริง [13]

จากรูปที่ 9 สำหรับสูตรการแปลงค่า LSB ของแรงดันไฟฟ้าประสิทธิภาพที่อ่านได้จากรีจิสเตอร์ให้เป็นค่าจริง และอ้างอิงจากรูปที่ 7 เมื่อรีจิสเตอร์ V_{RMS} มีค่าข้อมูลสูงสุดเท่ากับ 2^{15} ทำให้ได้สมการการแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าประสิทธิภาพให้เป็นค่าจริง ตามสมการที่ (9)

$$\text{LSB}_{V_{\text{RMS}}} = \frac{V_{\text{REF}} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)}{\text{cal}_V \cdot A_V \cdot 2^{15}} \quad [\text{V}] \quad (9)$$

จากตัวอย่าง [12] หน้า 11 กำหนดให้รีจิสเตอร์ $V1_{\text{RMS}}$ มีค่าเป็น 5714_{10} ทำการแทนค่าตัวแปรลงในสมการที่ (9) เพื่อแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าประสิทธิผลที่อ่านได้จากรีจิสเตอร์เป็นค่าจริง ทำให้ได้ผลลัพธ์ ดังนี้

$$V1_{\text{RMS}} = 5714 \cdot \frac{1.2 \text{ V} \cdot \left(1 + \frac{810000 \Omega}{470 \Omega}\right)}{0.875 \cdot 2 \cdot 2^{15}}$$

$$V1_{\text{RMS}} = 206.19 \text{ V}$$

ดังนั้น ค่า LSB ของรีจิสเตอร์แรงดันไฟฟ้าประสิทธิผล หรือ $V1_{\text{RMS}}$ ที่ค่า 5714_{10} สามารถแปลงให้เป็นค่าจริงของแรงดันไฟฟ้าประสิทธิผลที่ไอซี STPM34 วัดได้เท่ากับ $206.19 \text{ V}_{\text{RMS}}$

สำหรับสูตรการแปลงค่า LSB ของกระแสไฟฟ้าประสิทธิผลที่อ่านได้จากรีจิสเตอร์ให้เป็นค่าจริง และอ้างอิงจากรูปที่ 7 เมื่อรีจิสเตอร์ I_{RMS} มีค่าข้อมูลสูงสุดเท่ากับ 2^{17} ทำให้ได้สมการการแปลงค่ากระแสไฟฟ้าประสิทธิผลให้เป็นค่าจริง ตามสมการที่ (10)

$$\text{LSB}_{I_{\text{RMS}}} = \frac{V_{\text{REF}}}{\text{cal}_I \cdot A_I \cdot 2^{17} \cdot K_s \cdot K_{\text{int}}} \quad [\text{A}] \quad (10)$$

จากตัวอย่าง [12] หน้า 11 กำหนดให้รีจิสเตอร์ $C1_{RMS}$ มีค่าเป็น 488_{10} ทำการแทนค่าตัวแปรลงในสมการที่ (10) เพื่อแปลงค่ากระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพที่อ่านได้จากรีจิสเตอร์เป็นค่าจริง ทำให้ได้ผลลัพธ์ ดังนี้

$$I1_{RMS} = 488 \cdot \frac{1.2V}{0.875 \cdot 2 \cdot 2^{17} \cdot 2.4mV / A \cdot 1}$$

$$I1_{RMS} = 1.06 \text{ A}$$

ดังนั้น ค่า LSB ของรีจิสเตอร์กระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพ หรือ $C1_{RMS}$ ที่ค่า 488_{10} สามารถแปลงให้เป็นค่าจริงของกระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพที่ไอซี STPM34 วัดได้เท่ากับ 1.06 A_{RMS}

จากตัวอย่างการแปลงค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพจากรีจิสเตอร์ให้เป็นค่าจริงข้างต้น สามารถพิจารณาให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่า LSB ฐานสิบของรีจิสเตอร์กับค่าจริงของแรงดันและกระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพที่ไอซี STPM34 วัดได้ จากสมการที่ (9) และ (10) เมื่อ LSB ของรีจิสเตอร์เปลี่ยนแปลง 1_{10} ค่า จะส่งผลให้ตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลของไอซี STPM34 รับรู้ถึงการเปลี่ยนแปลงค่าการวัดที่ความละเอียดของการวัดแรงดันไฟฟ้าประสิทธิภาพ 36 mV_{RMS} และความละเอียดของการวัดกระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพ 2.2 mA_{RMS} หรืออาจกล่าวได้ว่า เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าประสิทธิภาพที่ระดับ 36 mV_{RMS} หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพที่ระดับ 2.2 mA_{RMS} จะส่งผลให้ค่า LSB ของรีจิสเตอร์เปลี่ยนแปลง 1_{10} ค่านั้นเอง

2.2.4 โพรโตคอลการสื่อสารของไอซีวัตพลังงานไฟฟ้า STPM34

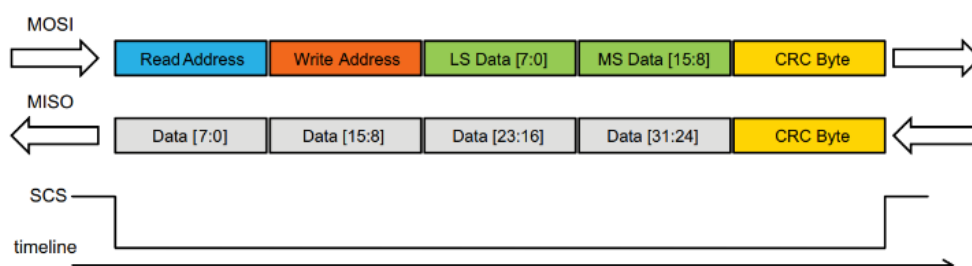
โพรโตคอลการสื่อสารของไอซีวัตพลังงานไฟฟ้า STPM34 [13] ประกอบด้วย 4+1 (Optional CRC) ไบต์ของข้อมูลการจัดลำดับแบบ Full-duplex ดังแสดงในรูปที่ 10

Byte	Master-side transmitted data	Slave-side transmitted data
1	ADDRESS for 32-bit register to be read	Previously requested data byte LSB
2	ADDRESS for 16-bit register to be written	Previously requested data byte 2 out of 4
3	DATA for 16-bit register to be written, LSB	Previously requested data byte 3 out of 4
4	DATA for 16-bit register to be written, MSB	Previously requested data byte MSB
5 (optional)	Master CRC verification packet	Slave CRC verification packet

รูปที่ 10 โครงสร้าง Communication Session [13]

เมื่อ STPM34 ได้รับ Frame ข้อมูลจาก Master-side แล้ว จะตอบกลับข้อมูลตำแหน่งรีจิสเตอร์ 32 บิตของ Communication Session ก่อนหน้า ในช่วง session แรกของการส่งข้อมูลจาก Slave-side นั้น ข้อมูล 32 บิตที่เก็บไว้ในรีจิสเตอร์ความจำแรก (row 0) จะถูกจัดระเบียบไว้ใน packet เป็น packet ละ 8 บิต เพื่อให้ไบต์ที่มีนัยสำคัญน้อยที่สุด (Least Significant Byte ; LSB) ถูกส่งก่อน และไบต์ที่มีนัยสำคัญมากที่สุด (Most Significant Byte ; MSB) ถูกส่งทีหลัง นอกจากนี้ packet 8 บิตสุดท้าย (Cyclic Redundancy Check ; CRC) จะถูกส่งไปยัง Master-side เพื่อตรวจสอบว่าไม่มีข้อมูลสูญหายเกิดขึ้นระหว่างการส่งจาก Slave-side ไปยัง Master-side

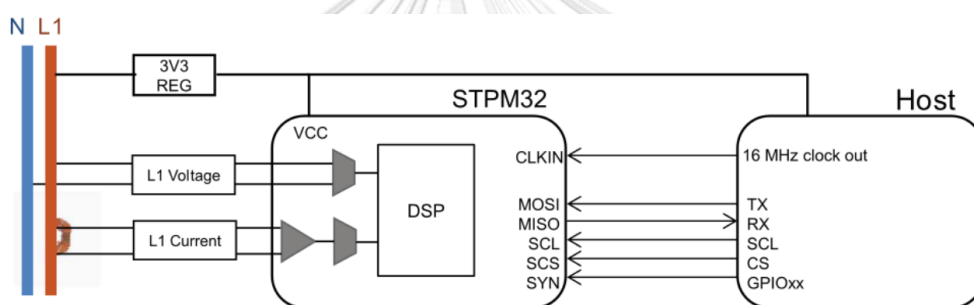
ในระหว่างการส่งข้อมูลนั้น ไบต์ที่ 3 ที่ส่งไปยัง MOSI (Master Out Slave In) เป็นไบต์ที่มีนัยสำคัญน้อยที่สุด (bit [7:0]) และไบต์ที่ 4 เป็นไบต์ที่มีนัยสำคัญมากที่สุด (bit [15:8]) ในส่วนของ MISO (Master In Slave Out) นั้นจะได้รับไบต์ข้อมูลแรกเป็นไบต์ที่มีนัยสำคัญน้อยที่สุด และลำดับสุดท้ายจะเป็นไบต์ที่มีนัยสำคัญมากที่สุด (bit [31:24]) ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 Single Communication Time Frame [13]

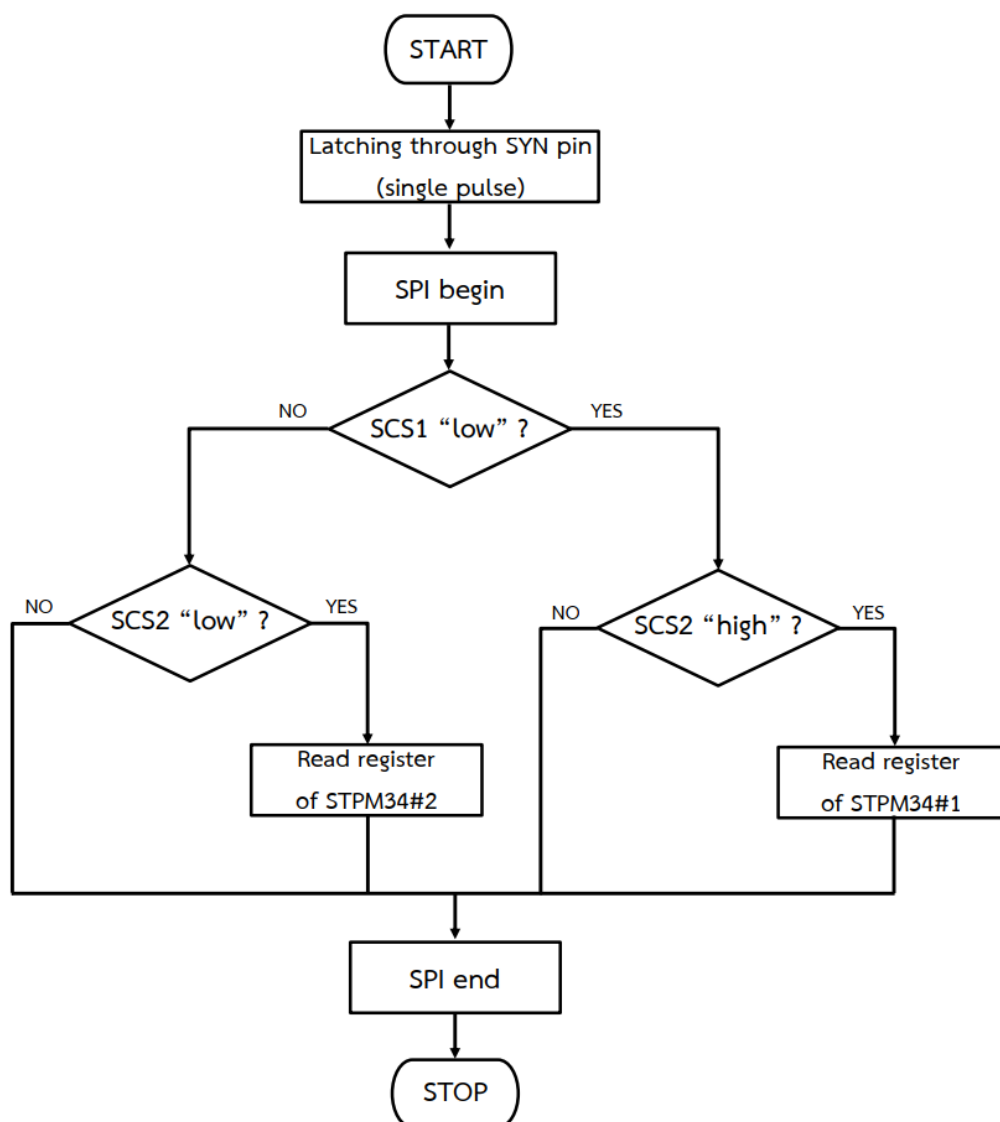
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้โปรโตคอลการสื่อสารแบบ SPI (Serial Peripheral Interface) สำหรับการเข้าถึงข้อมูลการวัดพลังงานไฟฟ้าที่ไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 จำนวนและเก็บไว้ในรีจิสเตอร์ขนาด 32 บิต จากรูปที่ 12 แสดงการเชื่อมต่อไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 เข้ากับ Host ซึ่งในที่นี้ก็คือบอร์ด Devio NB-Devkit I ผ่านโปรโตคอลการสื่อสารแบบ SPI โดยเป็นการเชื่อมต่อลักษณะ Mono Phase หรือแบบเฟสเดียว

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ออกแบบให้สามารถวัดค่าทางไฟฟ้าด้านทฤษฎีของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ระบบ 22 kV 3 เฟส 4 สาย 400/230 V ได้ ดังนั้นจำเป็นต้องใช้ไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 จำนวน 2 ชุด สำหรับอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT ของวิทยานิพนธ์นี้ โดยลักษณะการเชื่อมต่อไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 เข้ากับ Host จะเป็นการเชื่อมต่อแบบ Poly Phase หรือแบบหลายเฟส ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อ 3.2.2 ต่อไป



รูปที่ 12 การเชื่อมต่อผ่านโปรโตคอลการสื่อสาร SPI แบบ Mono Phase [12]

เนื่องจากไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 จำนวน 1 ชุด สามารถวัดค่าทางไฟฟ้าได้ 2 เฟส ดังนั้นจำเป็นต้องใช้ไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 จำนวน 2 ชุด เพื่อให้สามารถวัดค่าทางไฟฟ้าด้านทฤษฎีของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ระบบ 22 kV 3 เฟส 4 สาย 400/230 V ได้ โดยสามารถอธิบายการอ่านค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 จำนวน 2 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 13 แผนผังการอ่านค่าทางไฟฟ้าของไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 จำนวน 2 ชุด

จากรูปที่ 13 แสดงแผนผังการอ่านค่าทางไฟฟ้าของไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 จำนวน 2 ชุด โดยหน่วยประมวลผลกลางจะทำการเรียกอ่านค่าทางไฟฟ้าของไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 ผ่านโปรโตคอลการสื่อสารแบบ SPI และกำหนดให้อ่านค่าของไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 ชุดที่ 1 ซึ่งทำการวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ก่อน จากนั้นทำการอ่านค่าของไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 ชุดที่ 2 ซึ่งทำการวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของเฟสที่ 3 โดยกระบวนการอ่านค่าจากรีจิสเตอร์ของไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 แต่ละชุด จะเกิดขึ้นในขณะที่ขาสัญญาณ SCS มีสถานะเป็น “low” ดังนั้น STPM34 แต่ละชุดจะต้องใช้ขาสัญญาณ SCS แยกกัน เพื่อให้สามารถแยกแยะข้อมูลการอ่านค่าทางไฟฟ้าแต่ละเฟสได้

2.3 เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิชนิดป้องกันน้ำ DS18B20

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ออกแบบให้วัดอุณหภูมิตำแหน่งครีบบระบายความร้อนด้านบนและด้านล่างเพื่อตรวจสอบสถานะการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ระบบ 22 kV 3 เฟส 4 สาย 400/230 V โดยเลือกใช้เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิชนิดป้องกันน้ำ DS18B20 [14] ที่มีความสามารถป้องกันน้ำ ความชื้น และสนิม โดยการหุ้มไอซี DS18B20 ด้วยท่อเหล็กกล้าทนสนิมคุณภาพสูง ดังแสดงในรูปที่ 14



รูปที่ 14 เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิชนิดป้องกันน้ำ DS18B20 [14]

รายละเอียดทางเทคนิคของเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิชนิดป้องกันน้ำ DS18B20 มีดังนี้

- ช่วงแหล่งจ่ายไฟฟ้า : 3.0 V ถึง 5.5 V
- ความละเอียดในการวัด : 9 ถึง 12 บิต
- ช่วงอุณหภูมิการทำงาน : -55 °C ถึง +125 °C
- สายสัญญาณ : สีแดง (VCC), สีดำ (GND) และสีเหลือง (Data)

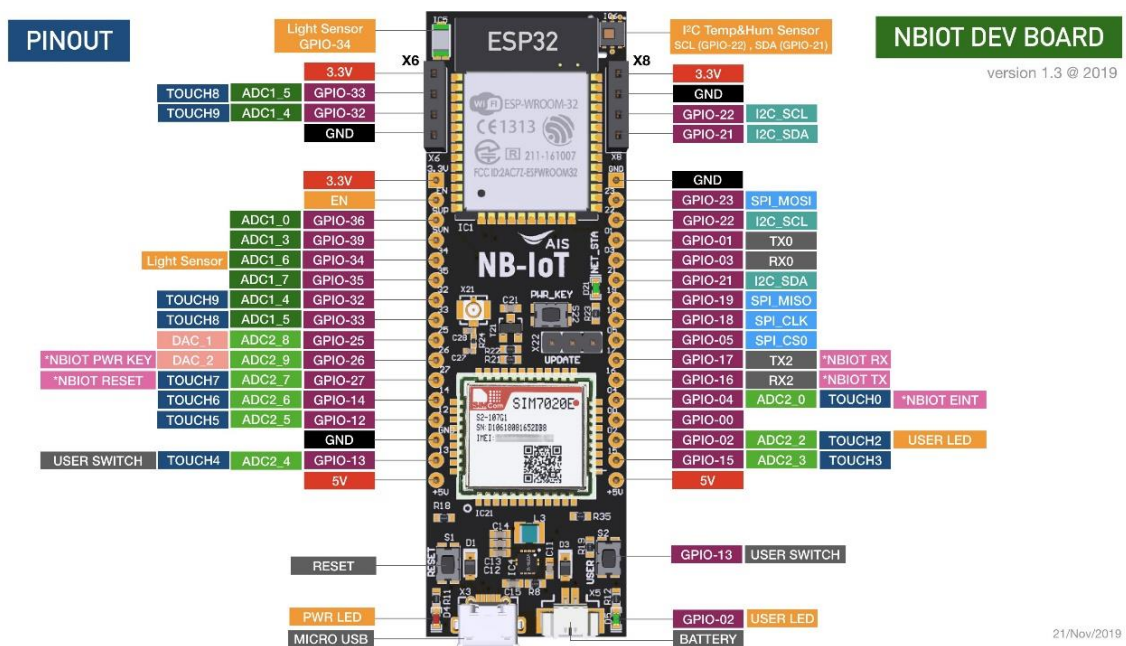
2.4 บอร์ด Devio NB-Devkit I

บอร์ด Devio NB-Devkit I [15] ที่พัฒนาโดยบริษัท AIS ซึ่งเป็นบอร์ดสำเร็จรูปที่รวมหน่วยประมวลผลกลางและส่วนการสื่อสาร NB-IoT เข้าด้วยกัน มาใช้เป็นหน่วยประมวลผลกลางของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT โดยหน่วยประมวลผลกลางของบอร์ดใช้ ESP32-WROOM-32 และโมดูล NB-IoT ใช้ SIM7020E ซึ่งมีอัตราการรับส่งข้อมูลสำหรับการ Uplink อยู่ที่ 62.5 kbps และ Downlink อยู่ที่ 26.15 kbps นอกจากนี้บอร์ด Devio NB-Devkit I ยังมีเซ็นเซอร์วัดแสงแวลล่อมและเซ็นเซอร์วัดความชื้นและอุณหภูมิรวมอยู่บนบอร์ดอีกด้วย



รูปที่ 15 บอร์ด Devio NB-Devkit I [15]

ภาคจ่ายไฟสำหรับหน่วยประมวลผลกลางของบอร์ด ESP32-WROOM-32 ใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 3.3 โวลต์ และภาคจ่ายไฟสำหรับบอร์ด Devio NB-Devkit I นั้นใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 5 โวลต์ โดยเซ็นเซอร์วัดแสงแวลล่อมโมเดล TEMT6000X01 และเซ็นเซอร์วัดความชื้นและอุณหภูมิโมเดล HDC1080 จะถูกติดตั้งอยู่ที่ตำแหน่งด้านบนซ้ายและขวาของบอร์ดตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 16

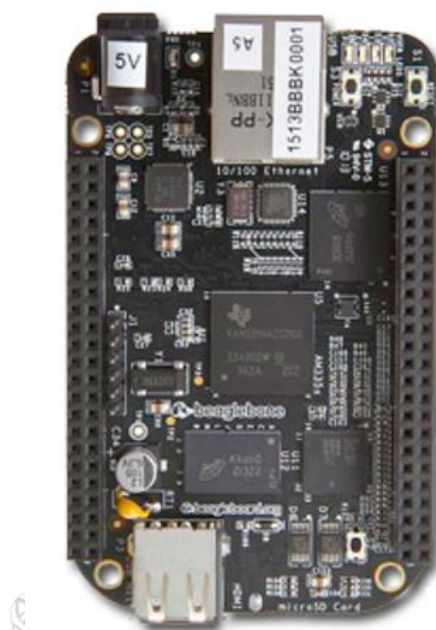


รูปที่ 16 Pinout ของบอร์ด Devio NB-Devkit I [15]

สำหรับการจัดเรียงขา Pinout ของบอร์ด Devio NB-Devkit I นั้น ประกอบด้วย ขาภาคจ่ายไฟ ภาคสัญญาณ เช่น ขา Input/Output, ขา ADC (Analog to Digital Converter), พอร์ตสำหรับการสื่อสารแบบ I2C (Inter-Integrated Circuit), พอร์ตสำหรับการสื่อสารแบบ UART (Universal Asynchronous Receiver and Transmitter) และพอร์ตสำหรับการสื่อสารแบบ SPI (Serial Peripheral Interface) ซึ่งถือได้ว่าบอร์ด Devio NB-Devkit I นั้นมี Pinout เพียงพอต่อการนำไปใช้งาน อีกทั้งหน่วยประมวลผลกลางของบอร์ดที่ใช้ ESP32-WROOM-32 ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงและยังติดตั้งโมดูล NB-IoT รวมไว้อีกด้วย ดังนั้นบอร์ด Devio NB-Devkit I จึงเหมาะที่จะนำไปใช้เป็นชุดหน่วยประมวลผลกลางของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

2.5 บอร์ด BeagleBone Black

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ออกแบบใช้บอร์ด BeagleBone Black เป็นศูนย์ข้อมูลของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย เนื่องจากมีประสิทธิภาพการประมวลผลสูง มีหน่วยความจำของบอร์ด และรองรับการทำงานร่วมกับ Software อื่นได้อย่างหลากหลาย อีกทั้งยังราคาประหยัดอีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 17



รูปที่ 17 บอร์ด BeagleBone Black [16]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายละเอียดทางเทคนิคของบอร์ด BeagleBone Black มีดังต่อไปนี้ [16]

1. ด้านหน่วยประมวลผล

- ตัวประมวลผล AM335x 1GHz ARM® Cortex-A8
- หน่วยความจำ 512MB DDR3 RAM
- หน่วยความจำแบบแฟลช 4GB 8-bit eMMC on-board
- 3D graphics accelerator
- NEON floating-point accelerator
- ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ 2x PRU 32-bit

2. ด้านการเชื่อมต่อ

- พอร์ต USB client สำหรับแหล่งจ่ายไฟและการติดต่อสื่อสาร
- พอร์ต USB host
- พอร์ต Ethernet
- พอร์ต HDMI
- พอร์ต GPIO ขนาด 2x46 ช่อง

3. ด้านการรองรับการทำงานร่วมกับ Software

- Debian
- Android
- Ubuntu
- Cloud9 IDE on Node.js w/ BoneScript library

2.6 เทคโนโลยี Narrowband IoT (NB-IoT)

NB-IoT [17] เป็นเทคโนโลยี IoT แถบความถี่แคบที่ระบุไว้ใน Release ที่ 3 ของ 3GPP ในเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2559 โพรโตคอลการสื่อสาร NB-IoT นั้นเป็นไปตามโปรโตคอล LTE ซึ่งในความเป็นจริง NB-IoT ได้ดัดฟังก์ชันการทำงานของโปรโตคอล LTE ให้เหลือน้อยที่สุดและปรับปรุงให้เข้ากับความต้องการสำหรับการใช้งาน IoT โดยปรับให้เหมาะกับข้อความข้อมูลขนาดเล็กและหลีกเลี่ยงคุณสมบัติที่ไม่จำเป็น ทำให้อุปกรณ์ปลายทางต้องการใช้แบตเตอรี่ในการทำงานเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้น เทคโนโลยี NB-IoT ถือได้ว่าเป็นการอินเทอร์เฟซทางอากาศแบบใหม่จากมุมมองโปรโตคอล Stack อีกทั้งยังสามารถให้บริการได้เกือบทุกพื้นที่ทั่วประเทศ ซึ่งเหมาะกับการให้บริการในพื้นที่ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

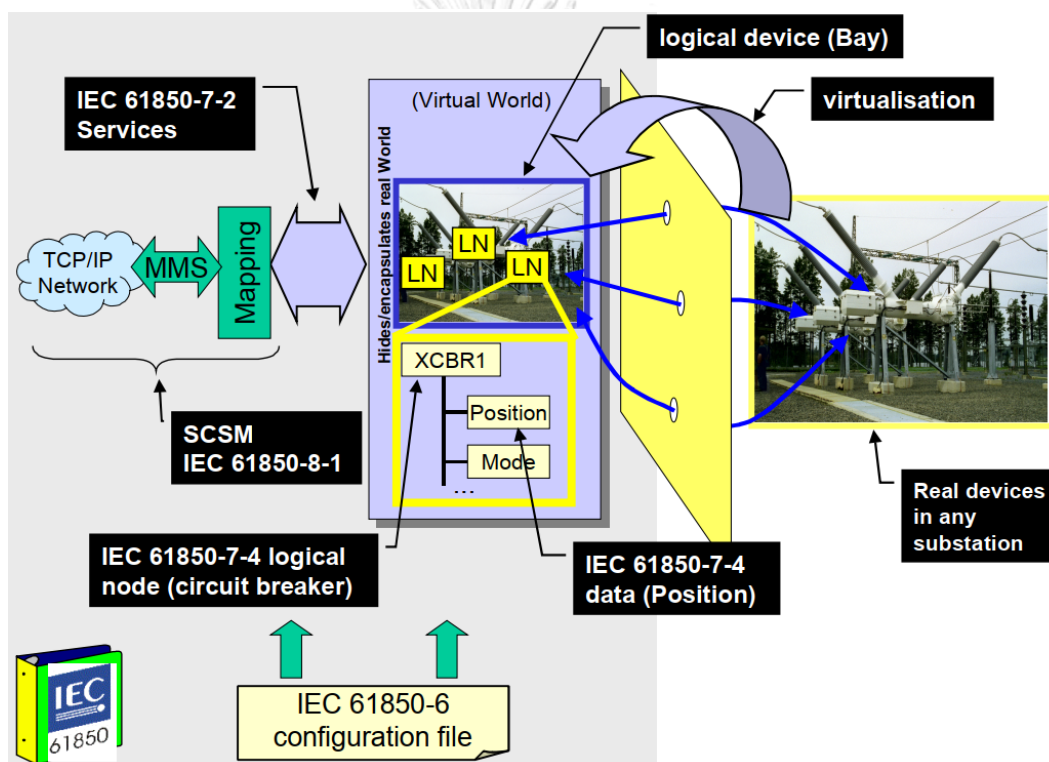
NB-IoT ช่วยให้สามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ปลายทางได้สูงสุด 100,000 อุปกรณ์ต่อสถานี ซึ่งใช้การแบ่งความถี่หลายการเข้าถึง (Frequency Division Multiple Access ; FDMA) ในการ uplink และการแบ่งความถี่แบบมอดูมสำหรับการ downlink แล้วใช้การมอดูเลตโดยการปรับเฟสการสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัส (Quadrature Phase-Shift Keying modulation ; QPSK) ซึ่งอัตราการส่งข้อมูลถูกจำกัดอยู่ที่ 200 kbps และ 20 kbps สำหรับการ downlink และ uplink ตามลำดับ โดยขนาดของข้อมูลที่บรรจุได้สูงสุด (Pay load) สำหรับแต่ละข้อความคือ 1,600 ไบต์ ดังแสดงในรูปที่ 18

	Sigfox	LoRaWAN	NB-IoT
Modulation	BPSK	CSS	QPSK
Frequency	Unlicensed ISM bands (868 MHz in Europe, 915 MHz in North America, and 433 MHz in Asia)	Unlicensed ISM bands (868 MHz in Europe, 915 MHz in North America, and 433 MHz in Asia)	Licensed LTE frequency bands
Bandwidth	100 Hz	250 kHz and 125 kHz	200 kHz
Maximum data rate	100 bps	50 kbps	200 kbps
Bidirectional	Limited / Half-duplex	Yes / Half-duplex	Yes / Half-duplex
Maximum messages/day	140 (UL), 4 (DL)	Unlimited	Unlimited
Maximum payload length	12 bytes (UL), 8 bytes (DL)	243 bytes	1600 bytes
Range	10 km (urban), 40 km (rural)	5 km (urban), 20 km (rural)	1 km (urban), 10 km (rural)
Interference immunity	Very high	Very high	Low
Authentication & encryption	Not supported	Yes (AES 128b)	Yes (LTE encryption)
Adaptive data rate	No	Yes	No
Handover	End-devices do not join a single base station	End-devices do not join a single base station	End-devices join a single base station
Localization	Yes (RSSI)	Yes (TDOA)	No (under specification)
Allow private network	No	Yes	No
Standardization	Sigfox company is collaborating with ETSI on the standardization of Sigfox-based network	LoRa-Alliance	3GPP

รูปที่ 18 ภาพรวมของเทคโนโลยี LPWAN [17]

2.7 มาตรฐาน IEC61850

มาตรฐาน IEC61850 [7] นิยมใช้งานอย่างแพร่หลายในสถานีไฟฟ้า เพื่อพัฒนาให้เป็นระบบสถานีไฟฟ้าอัตโนมัติ (Substation Automation System ; SAS) โดยมีจุดเด่นในการทำงานร่วมกันได้ของอุปกรณ์ Multi-vender และการสื่อสารด้วยความเร็วสูงระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะ (Intelligent Electronic Device ; IED) โดยแนวคิดการทำงานของมาตรฐาน IEC61850 จากรูปที่ 19 อุปกรณ์จริง (Real Device) ทางด้านขวามือ จะถูกจำลองเป็นแบบจำลองเสมือนจริงเรียกว่า Logical Device ทางด้านซ้ายมือ โดยมี Logical Node ที่กำหนดไว้ในแต่ละ Logical Device (ตัวอย่างเช่น Bay) ที่มีฟังก์ชันสอดคล้องกับฟังก์ชันการทำงานของอุปกรณ์จริง

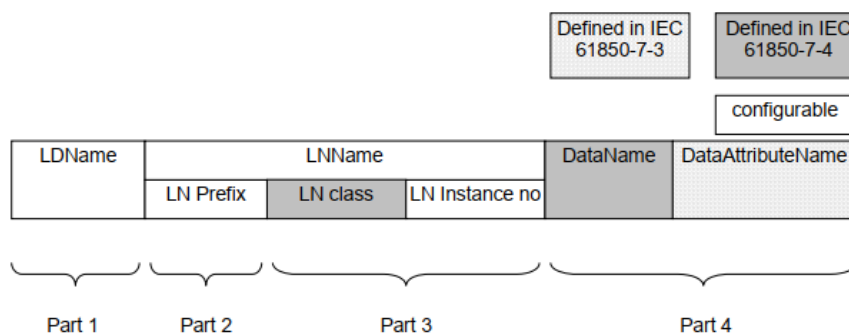


รูปที่ 19 แนวคิดการทำงานของมาตรฐาน IEC61850 [7]

ในตัวอย่างนี้ Logical Node “XCBR” แสดงถึงเซอร์กิตเบรกเกอร์ของ Bay ทางด้านขวามือ โดย Logical Node และข้อมูลที่อยู่ในแต่ละ Logical Device จะมีความสำคัญสำหรับการแลกเปลี่ยนข้อมูลระบบอัตโนมัติของสถานีไฟฟ้าในการเข้าถึงการทำงานร่วมกันได้ โดยชุดข้อมูลมาตรฐาน IEC61850 จะถูก Mapping ให้เป็น Manufacturing Message Specification หรือรายงานข้อมูล MMS เพื่อใช้สำหรับการสื่อสารข้อมูลต่อไป

2.7.1 การอ้างอิงชื่อข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850

การอ้างอิงชื่อข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 นั้น มีการกำหนดองค์ประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 20

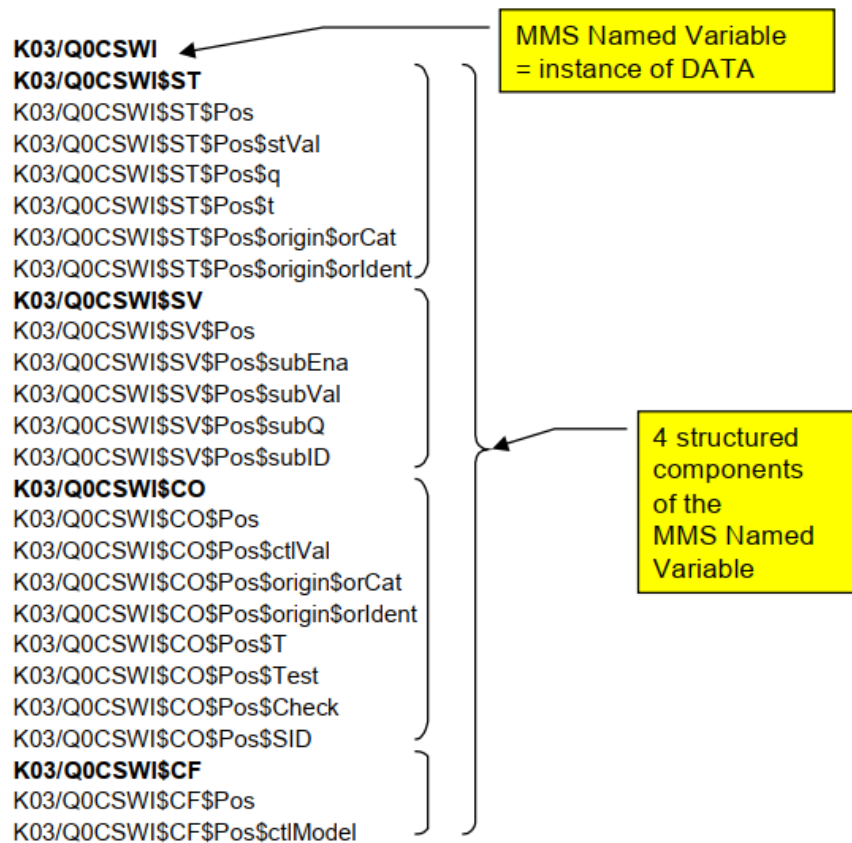


รูปที่ 20 องค์ประกอบการอ้างอิงชื่อข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 [18]

จากรูปที่ 20 รายละเอียดองค์ประกอบของการอ้างอิงชื่อข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 มีดังนี้

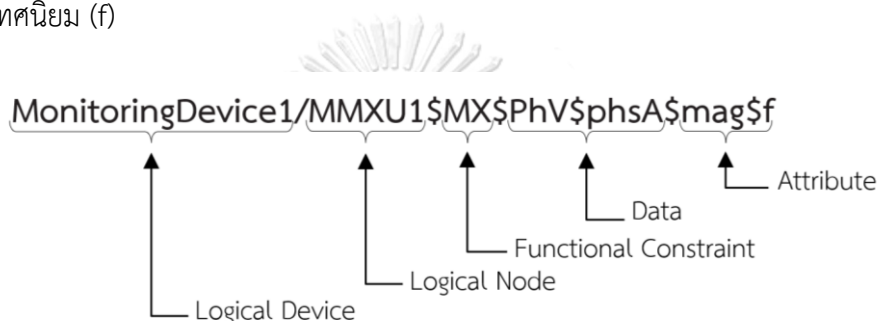
- Part 1 : คือ ส่วนที่กำหนดชื่ออุปกรณ์เสมือน หรือ Logical Device ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะ
- Part 2 : คือ ส่วนที่กำหนดชื่อฟังก์ชันการทำงานของอุปกรณ์เสมือน หรือ Logical Node
- Part 3 : คือ ส่วนที่กำหนดชื่อเพื่อแยกแยะการทำงานของแต่ละฟังก์ชัน โดยไม่ซ้ำกัน
- Part 4 : คือ ส่วนที่กำหนดชื่อและรายละเอียดคุณลักษณะของข้อมูล

ตัวอย่างโครงสร้างชื่อข้อมูล Manufacturing Message Specification (MMS) ตามมาตรฐาน IEC61850 ที่มีส่วน Logical Device แสดงชื่ออุปกรณ์ K03 ส่วน Logical Node แสดงชื่ออุปกรณ์การวัด Q0CSWI โดยส่วน Functional Constraint คือองค์ประกอบที่ถูกสร้างขึ้นโดยการเลือกลักษณะของข้อมูลทั้งหมดที่มีฟังก์ชันการทำงานเหมือนอุปกรณ์จริง เช่น ST แสดงสถานะคุณลักษณะข้อมูลทั้งหมด ส่วน Data Class แสดงลักษณะของข้อมูล เช่น Pos แสดงสถานะ Switch Position และส่วน Data Attribute จะขยายคุณลักษณะสถานะตำแหน่งของข้อมูล เช่น stVal , q และ t เป็นต้น ทั้งนี้ใช้เครื่องหมาย “\$” คั่นไว้ระหว่างแต่ละส่วนของชื่อข้อมูล MMS ดังแสดงในรูปที่ 21



รูปที่ 21 ตัวอย่างโครงสร้างชื่อข้อมูล MMS ตามมาตรฐาน IEC61850 [7]

การอ้างอิงชื่อข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 ที่ใช้หลักการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ (Object Oriented Programming ; OOP) ซึ่งมีลักษณะที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับฟังก์ชันของระบบไฟฟ้า จากรูปที่ 22 แสดงตัวอย่างโครงสร้างชื่อวัตถุตามมาตรฐาน IEC61850 ที่ถูกนำเสนอในรูปแบบ ACSI [IEC61850] เช่น ส่วน Logical Device แสดงชื่ออุปกรณ์ MonitoringDevice1 ส่วน Logical Node แสดงอุปกรณ์การวัด (MMXU) ส่วน Functional Constraint แสดงฟังก์ชันการวัด (MX) ส่วน Data Class แสดงลักษณะของข้อมูล เช่น การวัดแรงดันไฟฟ้าเฟสเทียบกราวด์ (PhV) โดยระบุเป็นเฟสเอเทียบกราวด์ (phsA) และในส่วน Data Attribute จะแสดงคุณลักษณะข้อมูลของแรงดันไฟฟ้า เช่น ค่าแอมเพอจ (mag) และค่าทศนิยม (f)



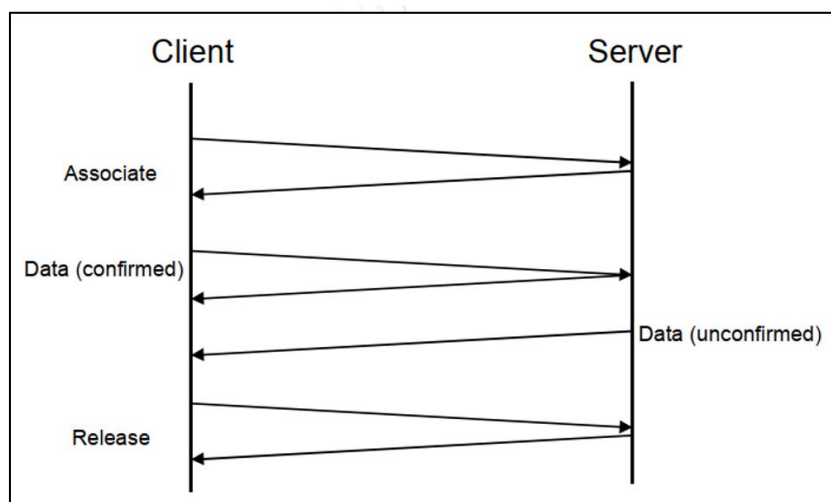
รูปที่ 22 ตัวอย่างการออกแบบโครงสร้างชื่อข้อมูล MMS ตามมาตรฐาน IEC61850

IEC61850-8-1 [19] กล่าวถึงการ Mapping วัตุนามธรรมและการบริการกับโปรโตคอล Manufacturing Message Specification (MMS) ของ ISO9506 เนื่องจาก MMS เป็นโปรโตคอลสาธารณะ ซึ่งมีประวัติการใช้งานที่พิสูจน์แล้วว่าสามารถรองรับการตั้งชื่อและบริการที่ซับซ้อนได้ ดังนั้น MMS จึงเป็นตัวเลือกที่ดีมากเพราะสามารถรองรับวัตถุที่มีชื่อซับซ้อนและการบริการมากมาย ที่รองรับการทำ Mapping กับมาตรฐาน IEC61850 ได้โดยตรงไปตรงมา ตัวอย่างเช่น แอปพลิเคชัน Sampled Values (SV) และ Generic Object Oriented Substation Event (GOOSE) จะทำการ Mapping เข้ากับเฟรมข้อมูลอีเทอร์เน็ต (Ethernet data frame) โดยตรง ซึ่งจะช่วยลดการประมวลผลของ Layer กลางใด ๆ และชั้นการเชื่อมต่อ MMS ยังสามารถทำงานผ่าน TCP/IP ได้

2.7.2 เครือข่ายการสื่อสารตามมาตรฐาน IEC61850

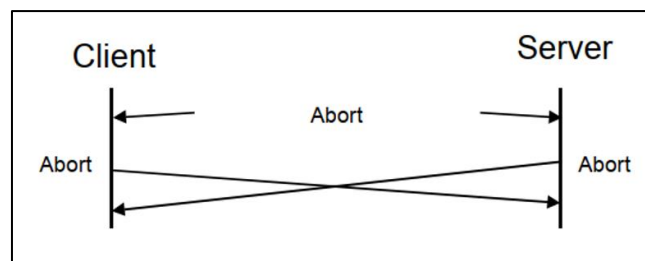
เครือข่ายการสื่อสารตามมาตรฐาน IEC61850 คือ การสื่อสารและแลกเปลี่ยนข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 ระหว่างฝั่ง Client และ Server สามารถแยกออกเป็น 2 แบบ ดังนี้ [20]

- 1) TWO-PARTY-APPLICATION-ASSOCIATION (TPAA) คือ การสื่อสารและแลกเปลี่ยนข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 ระหว่าง Client และ Server แบบสองทิศทาง ซึ่งมีความน่าเชื่อถือสูงมาก เนื่องจากการควบคุมการไหลของข้อมูลจากต้นทางจนถึงปลายทาง ดังแสดงในรูปที่ 24



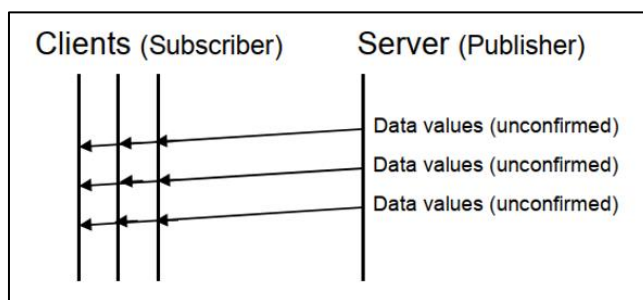
รูปที่ 24 การสื่อสารระหว่าง Client กับ Server แบบ TPAA [20]

สำหรับการยกเลิกการสื่อสารและแลกเปลี่ยนข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 ระหว่าง Client และ Server แบบ TPAA ดังแสดงในรูปที่ 25



รูปที่ 25 การยกเลิกการสื่อสารระหว่าง Client กับ Server แบบ TPAA [20]

- 2) MULTICAST-APPLICATION-ASSOCIATION (MCAA) คือ การสื่อสารและแลกเปลี่ยนข้อมูลมาตรฐาน IEC61850 ระหว่าง Client และ Server แบบทิศทางเดียว โดยการไหลของข้อมูลจะเริ่มจากข้อมูลต้นทางแหล่งเดียว (Server) ไปยังหนึ่งหรือหลาย ๆ ปลายทาง (Client) ซึ่งปลายทางสามารถตรวจสอบการสูญหายและการรับข้อมูลซ้ำได้ ดังแสดงในรูปที่ 26



รูปที่ 26 การสื่อสารระหว่าง Client กับ Server แบบ MCAA [20]

2.7.3 ไฟล์ Substation Configuration Description Language (SCL File)

Substation Configuration Description Language คือ ภาษาและรูปแบบการแสดงที่ระบุโดยมาตรฐาน IEC61850 สำหรับการกำหนดค่าของอุปกรณ์สถานีไฟฟ้า ซึ่งรวมถึงการแสดงข้อมูลแบบจำลองและบริการการสื่อสารที่ระบุโดยมาตรฐาน IEC61850 โดยการกำหนดค่าภาษา SCL นั้นอยู่บนพื้นฐานของภาษา Extensible Markup Language (XML) ที่มีโครงสร้างการอธิบายข้อมูลอย่างง่าย ไม่ซับซ้อน และสามารถใช้งานร่วมกับโปรแกรมประยุกต์อื่น ๆ ได้อย่างสะดวก ดังแสดงในรูปที่ 27

```
<xs:element name="SCL">
  <xs:complexType>
    <xs:complexContent>
      <xs:extension base="tBaseElement">
        <xs:sequence>
          <xs:element name="Header" type="tHeader">
            <xs:unique name="uniqueHitem">
              <xs:selector xpath="/scl:History/scl:Hitem"/>
              <xs:field xpath="@version"/>
              <xs:field xpath="@revision"/>
            </xs:unique>
          </xs:element>
          <xs:element ref="Substation" minOccurs="0" maxOccurs="unbounded"/>
          <xs:element ref="Communication" minOccurs="0"/>
          <xs:element ref="IED" minOccurs="0" maxOccurs="unbounded"/>
          <xs:element ref="DataTypeTemplates" minOccurs="0"/>
        </xs:sequence>
        <xs:attribute name="version" type="tSclVersion" use="required" fixed="2007"/>
        <xs:attribute name="revision" type="tSclRevision" use="required" fixed="A"/>
      </xs:extension>
    </xs:complexContent>
  </xs:complexType>
```

รูปที่ 27 ตัวอย่างไฟล์ Substation Configuration Description Language [18]

ไฟล์ SCL ถูกแบ่งออกเป็นหลายประเภท ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งานที่หลากหลาย ดังนี้ [21]

- IED Capability Description (ICD) คือ ไฟล์ที่ใช้กำหนดความสามารถของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะจากบริษัทผู้ผลิต

- System Specification Description (SSD) คือ ไฟล์ที่มีข้อมูลจำเพาะของระบบสถานีไฟฟ้าอัตโนมัติที่สมบูรณ์ รวมถึงไดอะแกรมเส้นเดียวและฟังก์ชันการทำงานของสถานีไฟฟ้าย่อย

- Substation Configuration Description (SCD) คือ ไฟล์ที่ใช้อธิบายรายละเอียดของสถานีไฟฟ้าย่อยที่สมบูรณ์ ประกอบด้วยส่วนของสถานีไฟฟ้าย่อย การสื่อสาร อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะ และรูปแบบชนิดของข้อมูล

- Configured IED Description (CID) คือ ไฟล์ที่ใช้ในการสื่อสารการกำหนดค่าทำงานระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะแต่ละตัว

- Instantiated IED Description (IID) คือ ไฟล์ที่ใช้กำหนดค่าการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะหนึ่งตัวในโครงการเดียวกัน

- System Exchange Description (SED) คือ ไฟล์ที่ใช้แลกเปลี่ยนข้อมูลของระบบระหว่างโครงการที่แตกต่างกัน

บทที่ 3

การออกแบบอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT

ในบทนี้ จะอธิบายถึง วิธีการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT โดยเนื้อหาในบทนี้จะแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อดังนี้

3.1 การออกแบบอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT

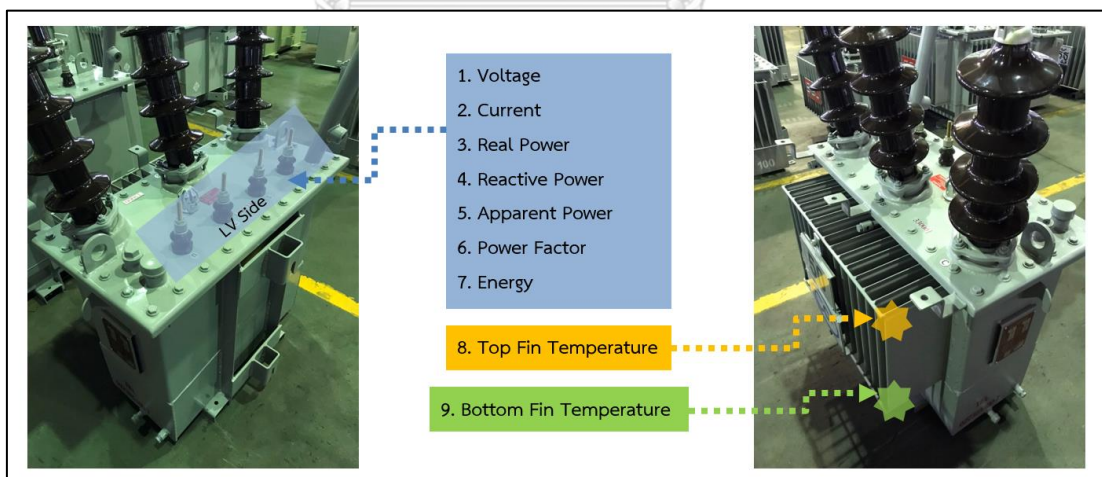
3.2 การออกแบบ Schematic ของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT

3.3 การออกแบบลายวงจรพิมพ์สำหรับอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT

3.4 การพัฒนาอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT

3.1 การออกแบบอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT

จากขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ได้กำหนดให้ออกแบบสร้างอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ระบบ 22 kV 3 เฟส 4 สาย 400/230 V ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยมี ความสามารถตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 28



รูปที่ 28 การออกแบบการวัดค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย

จากรูปที่ 28 การตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าประกอบด้วย แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ กำลังไฟฟ้าปรากฏ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และค่าพลังงานไฟฟ้า ซึ่งพิจารณาเฉพาะด้านหัตถุคณัมของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย เนื่องจากเป็นด้านแรงดันต่ำ

(LV Side) ที่จ่ายโหลดให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้า อีกทั้งยังมีความสะดวกและความปลอดภัยในการดำเนินงานมากกว่าด้านแรงสูง (HV Side)

สำหรับการตรวจวัดอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายนั้น เลือกตรวจวัดที่บริเวณครีประบายความร้อนด้านบนเปรียบเทียบกับครีประบายความร้อนด้านล่าง เนื่องจากขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดจะเกิดความร้อนขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกระบายผ่านฉนวนน้ำมัน ทำให้ฉนวนน้ำมันมีอุณหภูมิสูงขึ้น จึงเกิดการลอยตัวและไหลเวียนของฉนวนน้ำมันที่มีทิศทางไหลแบบบนลงล่างภายในโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าผ่านครีประบายความร้อน เพื่อให้อากาศภายนอกช่วยระบายความร้อนที่เกิดขึ้น ดังนั้น หากหม้อแปลงไฟฟ้ามีการจ่ายโหลดจริง อุณหภูมิที่บริเวณครีประบายความร้อนด้านบนและครีประบายความร้อนด้านล่างจะต้องมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ หากตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าแล้วพบว่าหม้อแปลงไฟฟ้าไม่ได้จ่ายโหลด แต่อุณหภูมิบริเวณครีประบายความร้อนทั้ง 2 ตำแหน่งดังกล่าวมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด จึงกล่าวได้ว่าหม้อแปลงไฟฟ้ามีแนวโน้มของสภาพการทำงานที่ไม่ปกติ

งานวิจัยนี้ออกแบบใช้ไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 จำนวน 2 ชุด เพื่อให้วัดค่าทางไฟฟ้าด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ระบบ 22 kV 3 เฟส 4 สาย 400/230 V ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้อย่างเหมาะสม การวัดค่าทางไฟฟ้าของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายนั้น จะติดตั้งประกอบหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าด้านแรงต่ำ หรือ ซีที. แรงต่ำเพื่อลดระดับกระแสไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ ก่อนต่อเข้าไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 โดยเลือกขนาดของ ซีที. แรงต่ำ ให้สัมพันธ์กับกระแสโหลดสูงสุดของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนี้ [22]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ตารางที่ 7 การเลือกขนาด ซีที. แรงต่ำ

ขนาดหม้อแปลงไฟฟ้า (kVA)	ขนาด ซีที. แรงต่ำ (A)
50	-
100	150/5
160	250/5
250	400/5

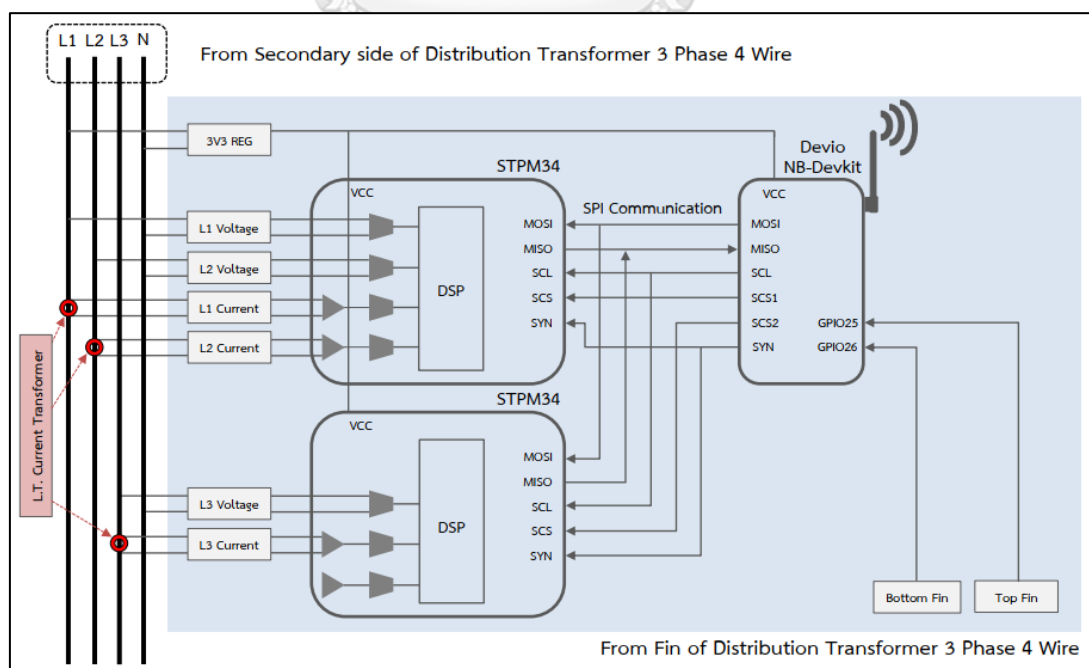
กรณีที่ไม่มีขนาดหม้อแปลงไฟฟ้าตามที่กำหนดในตารางข้างต้น ให้คำนวณหาขนาดกระแสสูงสุดของหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อกำหนดขนาด ซีที. แรงต่ำ ตามสมการที่ (11)

$$\text{ขนาดกระแส(แอมป์)} = \frac{\text{kVA} \times 1,000}{\sqrt{3} \times V_{\text{line}}} \quad (11)$$

เมื่อ kVA คือ ขนาดพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้า (กิโลโวลต์แอมป์)
 V_{line} คือ แรงดันพิกัดระหว่างสายด้านแรงต่ำ (โวลต์)

ทั้งนี้ให้เลือกใช้ขนาด ซีที. แรงต่ำ ที่ใกล้เคียง แต่ขนาดกระแสไม่เกิน 120 เปอร์เซ็นต์ของกระแสพิกัด ซีที. แรงต่ำ และกรณีหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 kVA สามารถวัดค่าทางไฟฟ้าด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าได้โดยตรง เนื่องจากกระแสไหลสูงสุดของหม้อแปลงไฟฟ้าไม่เกินกระแสพิกัดสูงสุดของไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 ดังนั้นอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายที่ออกแบบ สามารถใช้ร่วมกับหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ระบบ 22 kV 3 เฟส 4 สาย 400/230 V ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่ระบุในตารางที่ 7 ได้ทุกขนาด

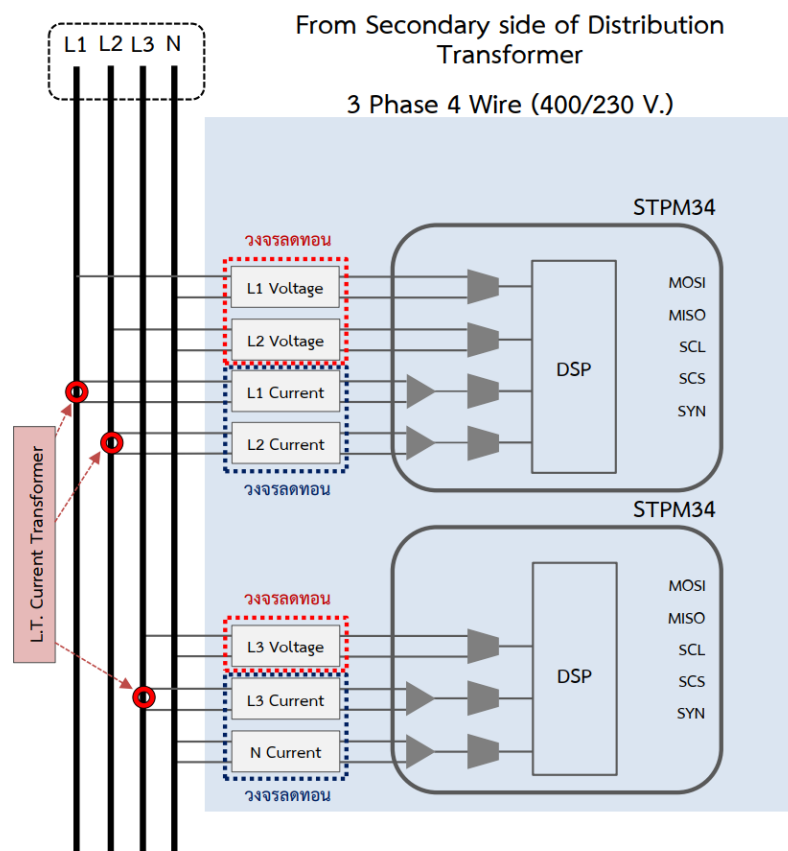
โดยข้อมูลการวัดค่าทางไฟฟ้าจากไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 จำนวน 2 ชุด จะถูกส่งไปยัง Devo NB-Devkit I ซึ่งทำหน้าที่เป็นหน่วยประมวลผลกลาง ผ่านโปรโตคอลการสื่อสารแบบ SPI รวมถึงข้อมูลค่าดิจิทัลของอุณหภูมิครึ่งระบายความร้อนด้านบนและด้านล่างของหม้อแปลงที่วัดได้จากเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิชนิดป้องกันน้ำ DS18B20 จำนวน 2 ชุด จะถูกส่งไปยัง Devo NB-Devkit I เช่นกัน ก่อนที่จะส่งข้อมูลการวัดทั้งหมดขึ้นคลาวด์ผ่านเครือข่าย NB-IoT ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 29



รูปที่ 29 การออกแบบอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย

3.1.1 การออกแบบวงจรลดทอนแรงดันและกระแสไฟฟ้า

วิทยานิพนธ์นี้ กำหนดให้ไอซี STPM34 สามารถวัดค่าทางไฟฟ้าด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ระบบ 22 kV 3 เฟส 4 สาย 400/230 V ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ดังนั้นการออกแบบระบบการวัดพลังงานไฟฟ้า จะต้องกำหนดย่านการวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ต้องการ เพื่อทำการออกแบบวงจรระดับแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้า ไอซี STPM34 ได้อย่างเหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 30

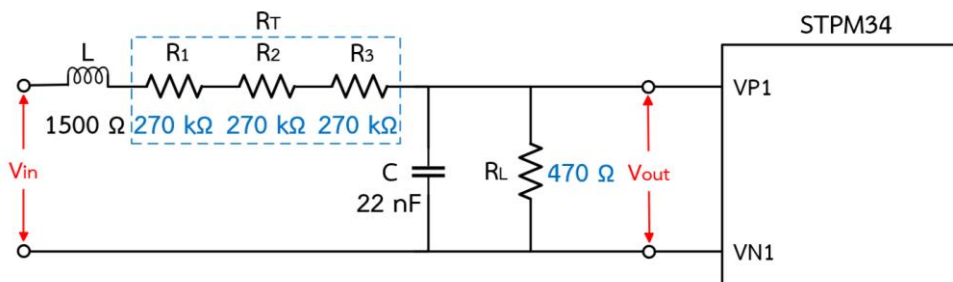


รูปที่ 30 การออกแบบวงจรลดทอนแรงดันและกระแสไฟฟ้า

3.1.2 การออกแบบวงจรวัดแรงดันไฟฟ้า

วงจรวัดแรงดันไฟฟ้าของวิทยานิพนธ์นี้ ออกแบบวงจรลดระดับแรงดันโดยใช้วงจรตัวต้านทานแบ่งแรงดันไฟฟ้า ของตัวต้านทาน R_T ที่มีความต้านทานรวม 810 k Ω และตัวต้านทาน R_L 470 Ω โดยตัวต้านทาน R_T นั้นประกอบด้วย R_1 , R_2 และ R_3 ที่มีความต้านทานแต่ละตัวเท่ากับ 270 k Ω ต่ออนุกรมกันอยู่ เพื่อให้ตัวต้านทานแต่ละตัวช่วยป้องกัน

แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเกินพิกัด สำหรับตัวเหนี่ยวนำ L 1500 Ω (ที่ความถี่ 100 MHz.) และตัวเก็บประจุ C 22 nF ใช้เป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ทำหน้าที่กรองสัญญาณรบกวนความถี่สูง ดังแสดงในรูปที่ 31



รูปที่ 31 การออกแบบวงจรวัดแรงดันไฟฟ้า

จากรูปที่ 31 จึงทำให้ได้สมการวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า ดังนี้

$$V_{OUT} = \frac{R_L}{R_T + R_L} \cdot V_{IN} \quad (12)$$

แรงดันไฟฟ้าเฟส (V_{PHASE}) ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ระบบ 22 kV 3 เฟส 4 สาย ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค มีค่าเท่ากับ 230 V_{RMS} ($V_{IN} = 230 V_{RMS}$)

เมื่อทำการแทนค่าตัวแปรลงในสมการที่ (12) เพื่อหาค่าแรงดันเอาต์พุตประสิทธิภาพ V_{OUT} ที่ป้อนเข้าตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลของไอซี STPM34 ทำให้ได้ผลลัพธ์ ดังนี้

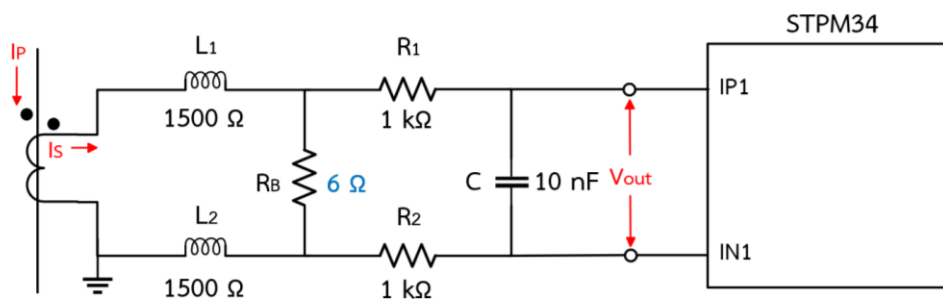
$$V_{OUT} = \frac{470 \Omega}{810000 \Omega + 470 \Omega} \cdot 230 V$$

$$V_{OUT} = 0.133 V$$

จากหัวข้อ 2.2.2 แรงดันไฟฟ้า V_{OUT} สูงสุดที่สามารถป้อนให้กับตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลของไอซี STPM34 มีค่าเท่ากับ 300 mV หรือแรงดันไฟฟ้าเฟสอินพุตประสิทธิภาพสูงสุดที่ไอซี STPM34 สามารถวัดได้ ต้องมีค่าน้อยกว่า 365.80 V_{RMS} ($V_{IN_MAX} < 365.80 V_{RMS}$) ดังนั้นการออกแบบวงจรวัดแรงดันไฟฟ้าง่ายๆข้างต้น เหมาะสมต่อการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ระบบ 22 kV 3 เฟส 4 สาย 400/230 V ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

3.1.3 การออกแบบวงจรวัดกระแสไฟฟ้า

วงจรวัดกระแสไฟฟ้าของวิทยานิพนธ์นี้ ออกแบบวงจรลดระดับกระแสโดยใช้หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า VAC 4626-X002 ที่มีอัตราส่วน Ratio 2500 : 1 ประกอบกับตัวต้านทานเบอร์เดนต่อขนาน R_B ค่า 6Ω ซึ่งให้กระแสต้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าไหลผ่านและเกิดแรงดันตกคร่อม V_{OUT} เพื่อแปลงค่ากระแสเป็นแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลของไอซี STPM34 ต่อไป สำหรับตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 ค่า 1500Ω (ที่ความถี่ 100 MHz .) ตัวต้านทาน R_1 และ R_2 ค่า $1 \text{ k}\Omega$ และตัวเก็บประจุ C 10 nF ใช้เป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ทำหน้าที่กรองสัญญาณรบกวนความถี่สูง ดังแสดงในรูปที่ 32



รูปที่ 32 การออกแบบวงจรวัดกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 33 หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า VAC 4626-X002

จากรูปที่ 32 ทำให้ได้สมการแรงดันไฟฟ้า V_{OUT} ดังนี้

$$V_{OUT} = R_B \cdot I_s \quad (13)$$

หรือ

$$I_S = \frac{V_{OUT}}{R_B} \quad (14)$$

จากหัวข้อ 2.2.2 แรงดันไฟฟ้า V_{OUT} สูงสุดที่สามารถป้อนให้กับตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลของไอซี STPM34 มีค่าเท่ากับ 300 mV ทำการแทนค่าตัวแปรลงในสมการที่ (14) เพื่อหาค่ากระแสต้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงสุดที่ป้อนเข้าตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลของไอซี STPM34 ทำให้ได้ผลลัพธ์ ดังนี้

$$I_S = \frac{300\text{mV}}{6\Omega}$$

$$I_S = 50 \text{ mA}$$

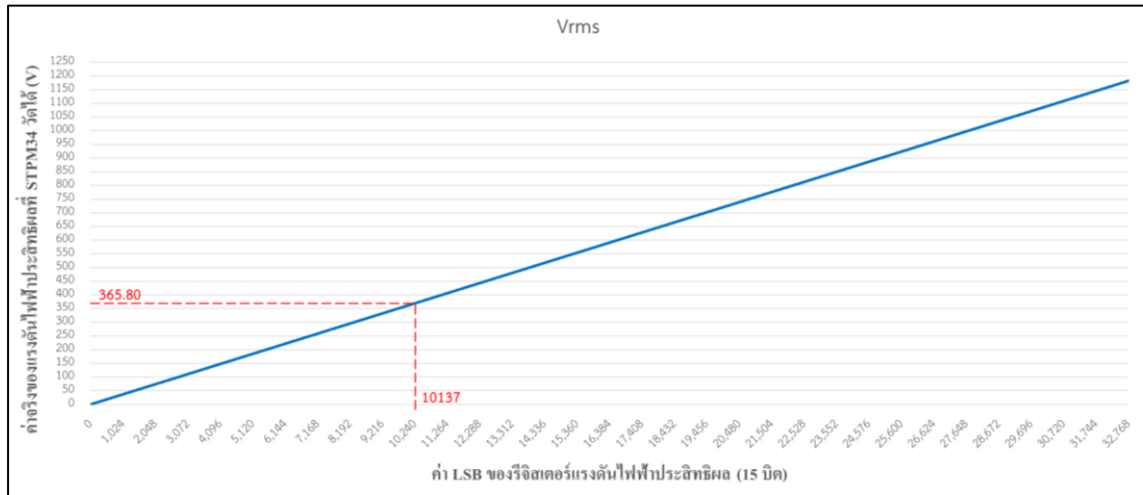
เมื่อหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า VAC 4626-X002 ที่มีอัตราส่วน Ratio 2500 : 1 หมายความว่า เมื่อกระแสต้านปฐมภูมิ (I_P) ของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้ามีค่า 2500 A จะทำให้กระแสต้านทุติยภูมิ (I_S) ซึ่งแปรค่าตามอัตราส่วน Ratio โดยมีค่าเท่ากับ 1 A

จากผลลัพธ์ของสมการที่ (14) คือ ค่ากระแสต้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงสุด $I_{S_MAX} = 50 \text{ mA}$ ดังนั้นหากแปลงเป็นค่ากระแสต้านปฐมภูมิของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงสุดหรือค่ากระแสประสิทธิภาพสูงสุดของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ระบบ 22 kV 3 เฟส 4 สาย 400/230 V ผ่านอัตราส่วน Ratio 2500 : 1 จะมีค่าเท่ากับ 125 A ($I_{P_MAX} = 125 \text{ A}$)

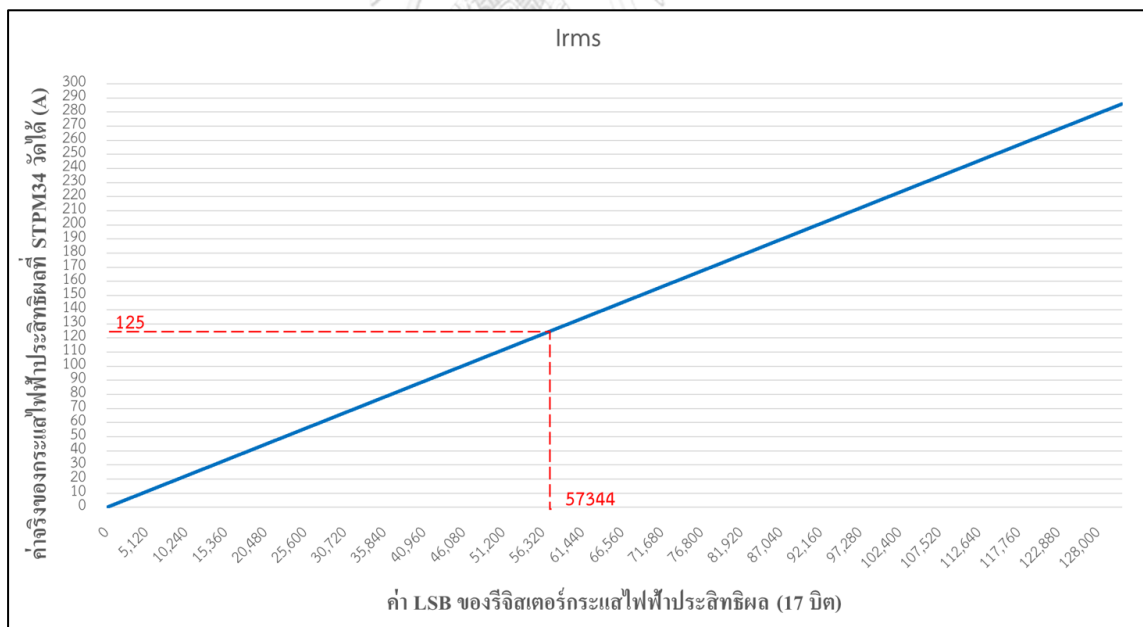
ดังนั้น กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 kVA สามารถวัดค่าทางไฟฟ้าด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าได้โดยตรง เนื่องจากกระแสไหลสูงสุดของหม้อแปลงไฟฟ้าไม่เกินกระแสพิกต์สูงสุดของไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 สำหรับหม้อแปลงขนาดมากกว่า 50 kVA จะต้องติดตั้งประกอบหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าด้านแรงต่ำ หรือ ซีที. แรงต่ำ เพื่อลดระดับกระแสไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ ก่อนต่อเข้าไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 โดยเลือกขนาดของ ซีที. แรงต่ำให้สัมพันธ์กับกระแสไหลสูงสุดของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนั้นวงจรวัดกระแสไฟฟ้าที่ออกแบบสามารถใช้ร่วมกับหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ระบบ 22 kV 3 เฟส 4 สาย 400/230 V ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่ระบุในตารางที่ 7 ได้ทุกขนาด

เมื่อออกแบบระบบการวัดแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และย่านวัดของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายเสร็จแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็คือการเปรียบเทียบ

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LSB ฐานสิบของรีจิสเตอร์กับค่าจริงของแรงดันและกระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพที่ไอซี STPM34 วัดได้ ดังแสดงในรูปที่ 34 และรูปที่ 35 ตามลำดับ



รูปที่ 34 การเปรียบเทียบค่า LSB ฐานสิบของรีจิสเตอร์กับค่าจริงของแรงดันไฟฟ้าประสิทธิภาพที่ไอซี STPM34 วัดได้

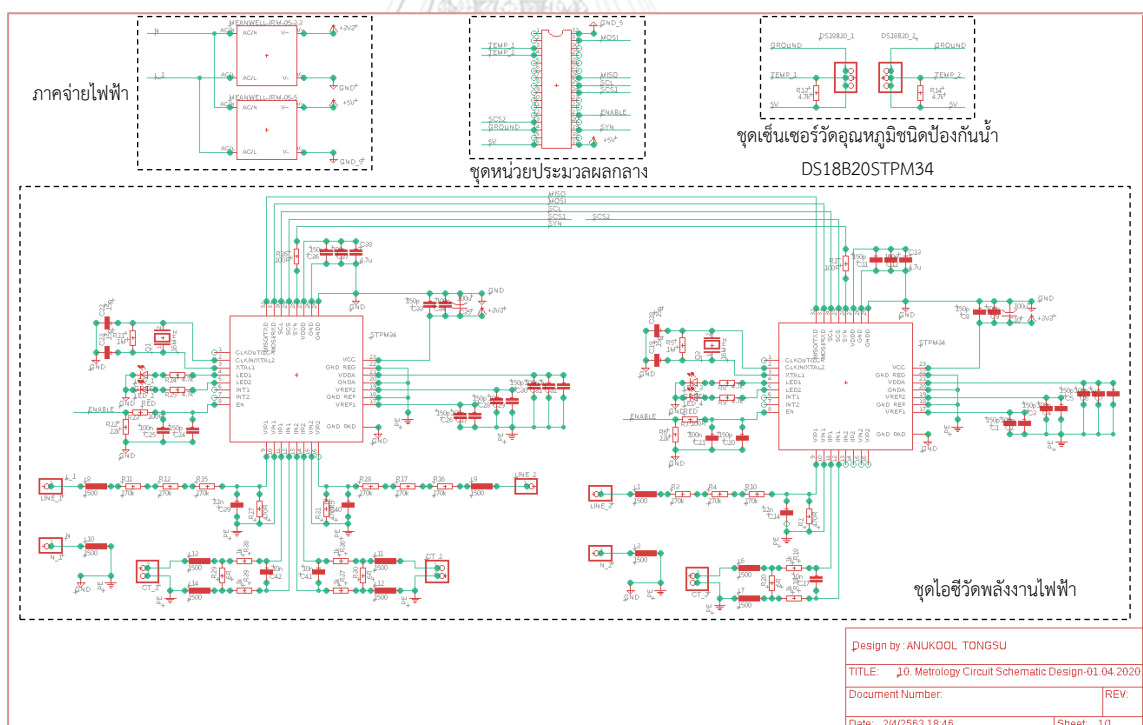


รูปที่ 35 การเปรียบเทียบค่า LSB ฐานสิบของรีจิสเตอร์กับค่าจริงของกระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพที่ไอซี STPM34 วัดได้

3.2 การออกแบบ Schematic ของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้โปรแกรม EAGLE ที่พัฒนาโดยบริษัท Autodesk สำหรับการออกแบบแผนผังวงจรไฟฟ้า (Schematic) และลายวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board ; PCB) โดยในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงการออกแบบ Schematic โดยรวม ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ทุกส่วนที่นำมาใช้พัฒนาให้เป็นอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT รวมถึงการเชื่อมต่อภาคสัญญาณ ภาคจ่ายไฟเลี้ยงตามรายละเอียดทางเทคนิคของแต่ละอุปกรณ์ เพื่อให้สามารถทำงานร่วมกันตามวัตถุประสงค์ของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT ได้

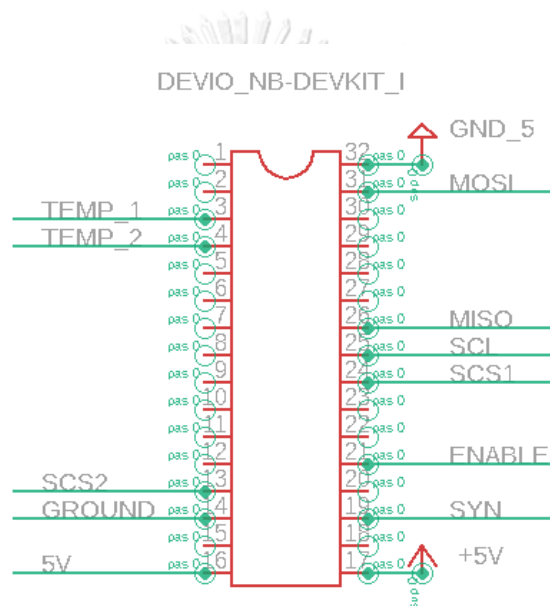
การออกแบบ Schematic โดยรวมของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT นั้น ประกอบด้วยการออกแบบ Schematic ของชุดหน่วยประมวลผลกลาง ชุดไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 ชุดเซ็นเซอร์อุณหภูมิชนิดป้องกันน้ำ DS18B20 และภาคจ่ายไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 36



รูปที่ 36 Schematic ของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT

3.2.1 การออกแบบ Schematic ของชุดหน่วยประมวลผลกลาง

การออกแบบ Schematic ของชุดหน่วยประมวลผลกลาง Devio NB-Devkit I นั้น ประกอบด้วย การเชื่อมต่อวงจรไฟเลี้ยงกระแสตรง 5 V การเชื่อมต่อกับชุดไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 เพื่ออ่านค่าทางไฟฟ้าด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ระบบ 22 kV 3 เฟส 4 สาย 400/230 V ผ่านโปรโตคอลการสื่อสารแบบ SPI และการเชื่อมต่อกับชุดเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิชนิดป้องกันน้ำ DS18B20 ผ่านขา ADC สำหรับการอ่านค่าอุณหภูมิที่ระบายความร้อนด้านบนและด้านล่างของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ดังแสดงในรูปที่ 37

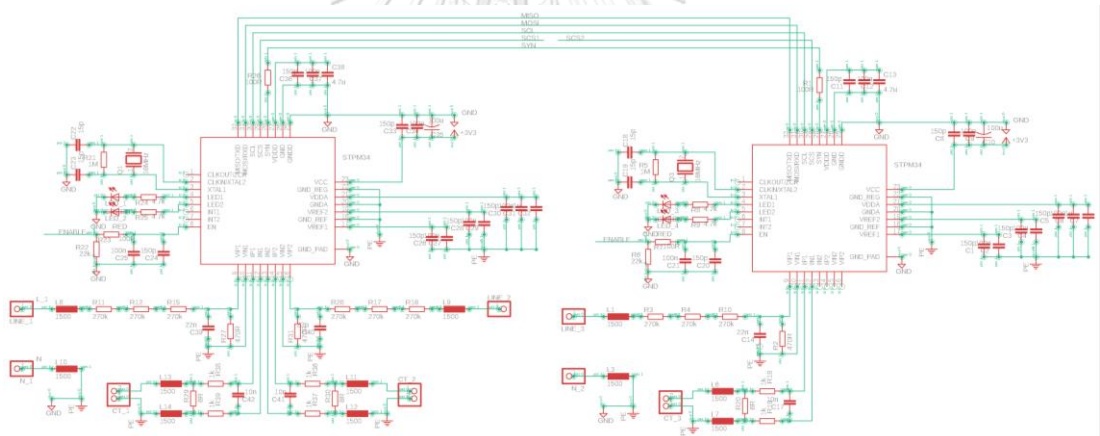


รูปที่ 37 Schematic ของชุดหน่วยประมวลผลกลาง

3.2.2 การออกแบบ Schematic ของชุดไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34

ไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 จำนวน 1 ชุด สามารถวัดค่าทางไฟฟ้าได้ 2 เฟส โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ออกแบบให้สามารถวัดค่าทางไฟฟ้าด้านทฤษฎีของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ระบบ 22 kV 3 เฟส 4 สาย 400/230 V ได้ ดังนั้นจำเป็นต้องใช้ไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 จำนวน 2 ชุด สำหรับอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT ของวิทยานิพนธ์นี้

การเชื่อมต่อระหว่างไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 ให้สามารถวัดค่าทางไฟฟ้าด้านทฤษฎีของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ระบบ 22 kV 3 เฟส 4 สาย 400/230 V ได้นั้น ทำได้โดยการเชื่อมต่อสายสัญญาณของโปรโตคอลการสื่อสารแบบ SPI ของไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 ทั้ง 2 ชุดเข้าด้วยกัน ประกอบด้วยขา MOSI, MISO, SCL และ SYN โดยยกเว้นเฉพาะขา SCS ที่ STPM34 แต่ละชุดจะต้องใช้แยกกัน เพื่อให้สามารถแยกแยะข้อมูลการอ่านค่าทางไฟฟ้าแต่ละเฟสได้ ดังแสดงในรูปที่ 38



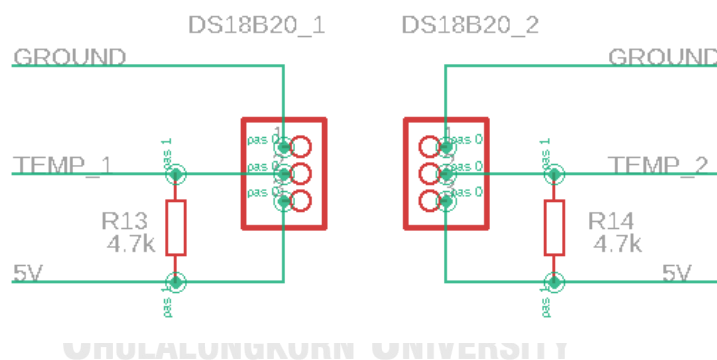
รูปที่ 38 Schematic ของชุดไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34

สำหรับอุปกรณ์ประกอบชุดไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 นั้น สามารถทำการเชื่อมต่อและกำหนดค่าของแต่ละอุปกรณ์ได้ตามคู่มือนี้ [13]

3.2.3 การออกแบบ Schematic ของชุดเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิชนิดป้องกันน้ำ DS18B20

วิทยานิพนธ์นี้ออกแบบให้สามารถวัดอุณหภูมิครีบบระบายความร้อนด้านบนและด้านล่างของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย โดยเลือกใช้เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิชนิดป้องกันน้ำ DS18B20 ของบริษัท Dallas Semiconductor ซึ่งเป็นไอซีวัดอุณหภูมิแบบดิจิทัล โดยมีความสามารถวัดอุณหภูมิและแปลงให้เป็นค่าดิจิทัลย่าน $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ ได้ที่ความละเอียด 9 ถึง 12 บิต

การออกแบบ Schematic ของชุดเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิชนิดป้องกันน้ำ DS18B20 นั้น ประกอบด้วยการต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 5 V เข้าขาที่ 3 และต่อกราวด์เข้าขาที่ 1 โดยขาที่ 2 นั้นเป็นขาข้อมูลดิจิทัลของอุณหภูมิที่ DS18B20 อ่านได้ ซึ่งจะทำการเชื่อมต่อไปยังชุดหน่วยประมวลผลกลางเพื่ออ่านค่าอุณหภูมิครีบบระบายความร้อนด้านบนและด้านล่างของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย นอกจากนี้ยังต่อความต้านทาน Pull-Up ขนาด $4.7\text{ k}\Omega$ ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 5 V เข้ากับขาที่ 2 เพื่อให้การแปลงอุณหภูมิที่วัดได้ให้เป็นค่าดิจิทัลที่มีความเสถียร ดังแสดงในรูปที่ 39

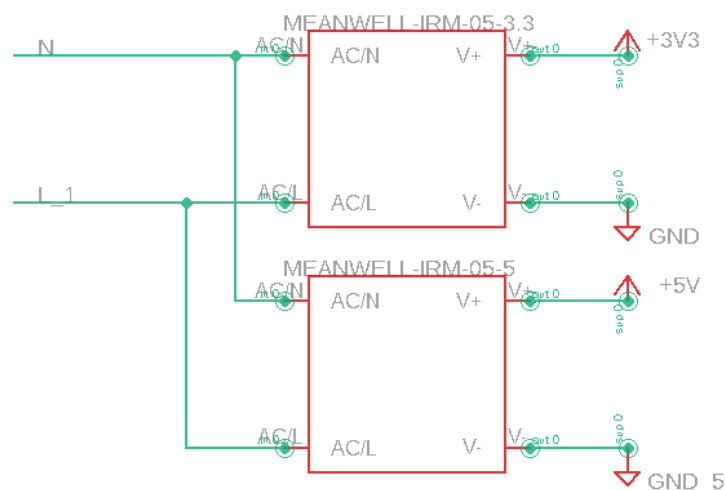


รูปที่ 39 Schematic ของชุดเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิชนิดป้องกันน้ำ DS18B20

3.2.4 การออกแบบ Schematic ของภาคจ่ายไฟฟ้า

การออกแบบ Schematic ของภาคจ่ายไฟฟ้าสำหรับวิทยานิพนธ์นี้ เลือกใช้โมดูลแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากบริษัท Mean Well จำนวน 2 ชุด ประกอบด้วยโมดูล IRM-05-3.3 และ IRM-05-5 ที่มีความสามารถแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้าช่วง 85 ถึง 305 V ให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาออกตามรายละเอียดของแต่ละโมดูล อีกทั้งยังมีระบบป้องกันการลัดวงจร แรงดันเกิน และการจ่ายโหลดเกินพิกัด นอกจากนี้ยังมีฟังก์ชันการลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าอีกด้วย

สำหรับโมดูลแหล่งจ่ายไฟฟ้า IRM-05-3.3 นั้น ใช้สำหรับจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 3.3 V ให้กับชุดไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 ส่วนโมดูลแหล่งจ่ายไฟฟ้า IRM-05-5 ใช้สำหรับจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 5 V ให้กับชุดหน่วยประมวลผลกลางและชุดเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิชนิดป้องกันน้ำ DS18B20 ดังแสดงในรูปที่ 40

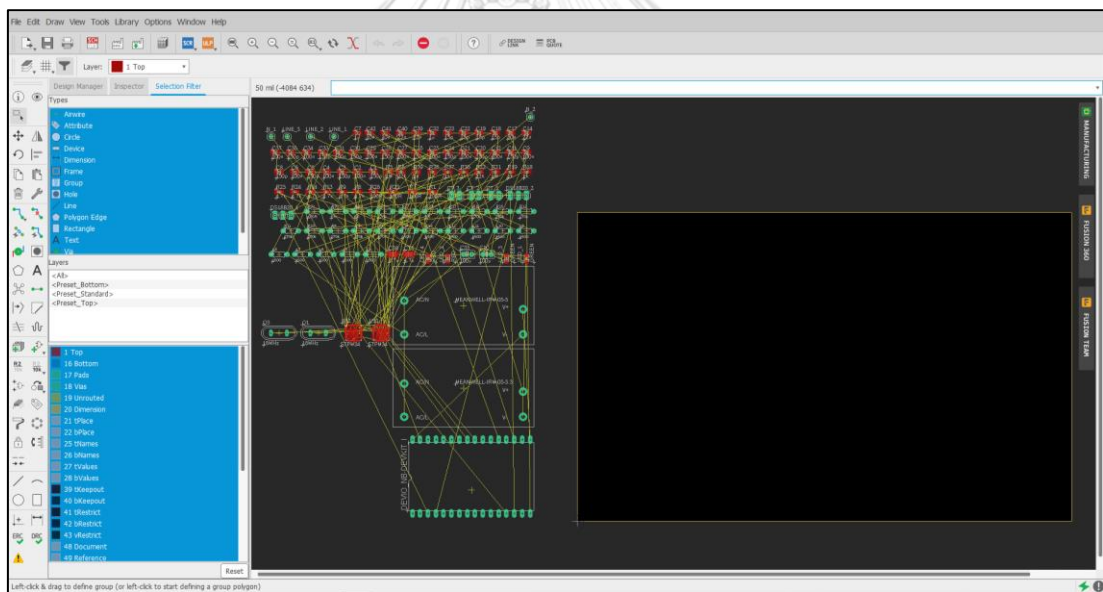


รูปที่ 40 Schematic ของภาคจ่ายไฟฟ้า

3.3 การออกแบบลายวงจรพิมพ์สำหรับอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT

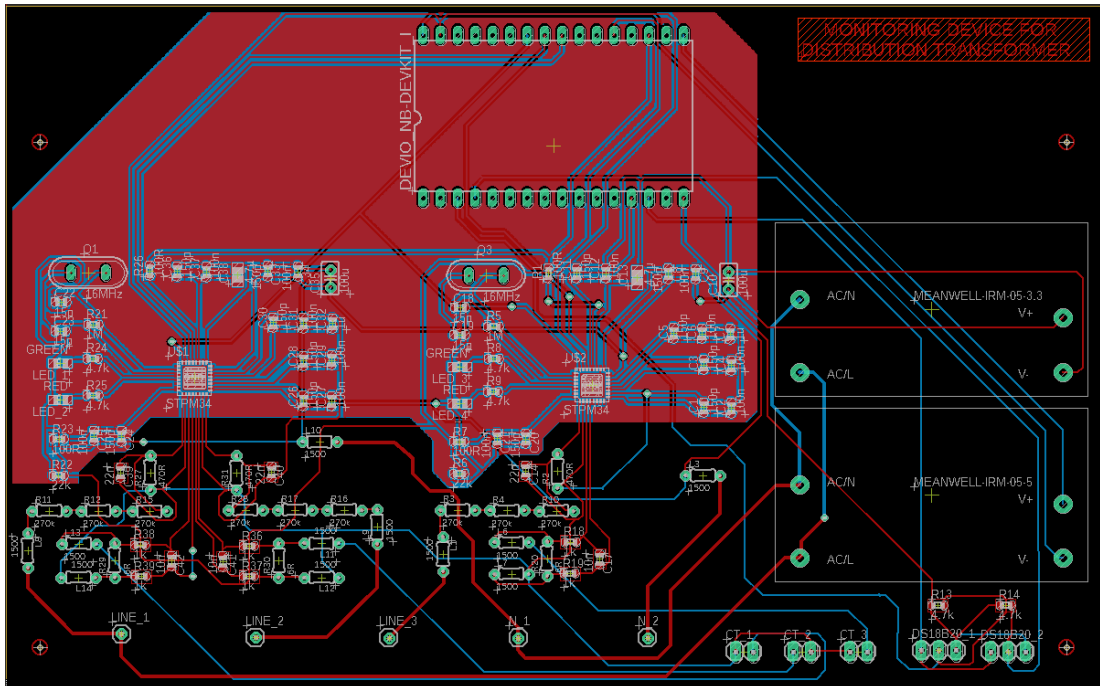
หลังจากการออกแบบ Schematic ครบทุกส่วนแล้ว ขั้นตอนต่อมาคือการนำ Schematic ที่ออกแบบไว้มาสร้างลายวงจรพิมพ์ของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT โดยการคลิกที่ Generate/switch to board เพื่อสร้างหน้าต่างสำหรับการออกแบบลายวงจรพิมพ์ จากนั้นทำการย้ายอุปกรณ์ให้อยู่ภายในพื้นที่ Layout ของบอร์ดและทำการจัดวางตำแหน่ง Footprint ของอุปกรณ์ตามตำแหน่งที่เหมาะสม

การจัดวางตำแหน่ง Footprint ของอุปกรณ์ที่เหมาะสมนั้น สืบเนื่องจากสายสัญญาณเส้นสี่เหลี่ยม (Airwire) ที่โปรแกรม EAGLE สร้างขึ้นให้อัตโนมัติ โดยอ้างอิงจากการเชื่อมต่อขาสัญญาณและไฟเลี้ยงของอุปกรณ์จากขั้นตอนการออกแบบ Schematic เพื่อให้สามารถสร้างสายสัญญาณ (Route Airwire) เชื่อมต่อระหว่างกันได้ง่าย ไม่ซับซ้อน

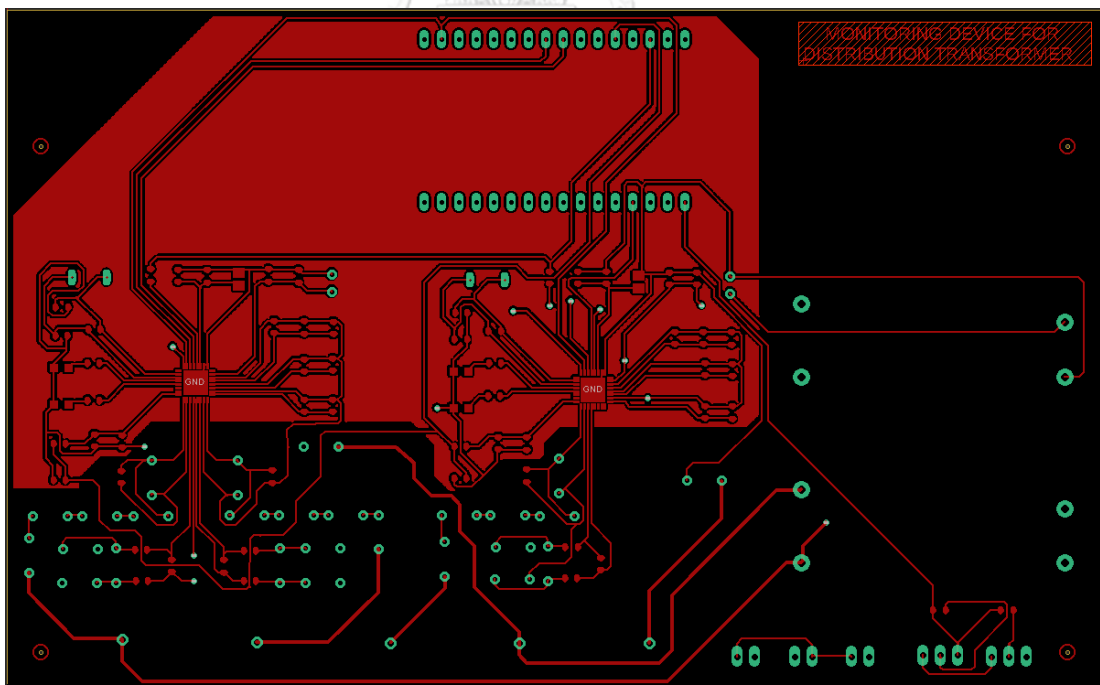


รูปที่ 41 หน้าต่างสำหรับการออกแบบลายวงจรพิมพ์

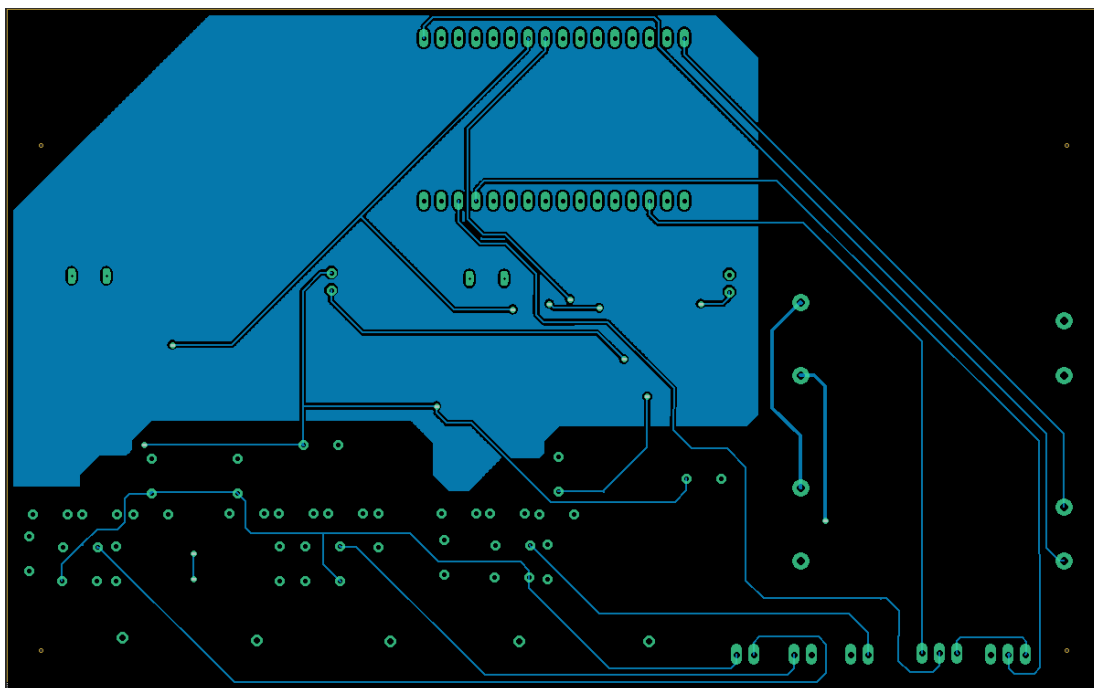
เมื่อออกแบบลายวงจรพิมพ์ครบทุกส่วนแล้ว อีกสิ่งหนึ่งที่สำคัญก็คือการทำ Ground Plane ให้กับแผ่นวงจรพิมพ์เพื่อช่วยลดสัญญาณรบกวน ดังรูปที่ 42 แสดงการออกแบบลายวงจรพิมพ์สำหรับอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT



รูปที่ 42 การออกแบบลายวงจรพิมพ์สำหรับอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย
ผ่านเครือข่าย NB-IoT



รูปที่ 43 ลายวงจรพิมพ์ด้าน Top Layer ของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย
ผ่านเครือข่าย NB-IoT



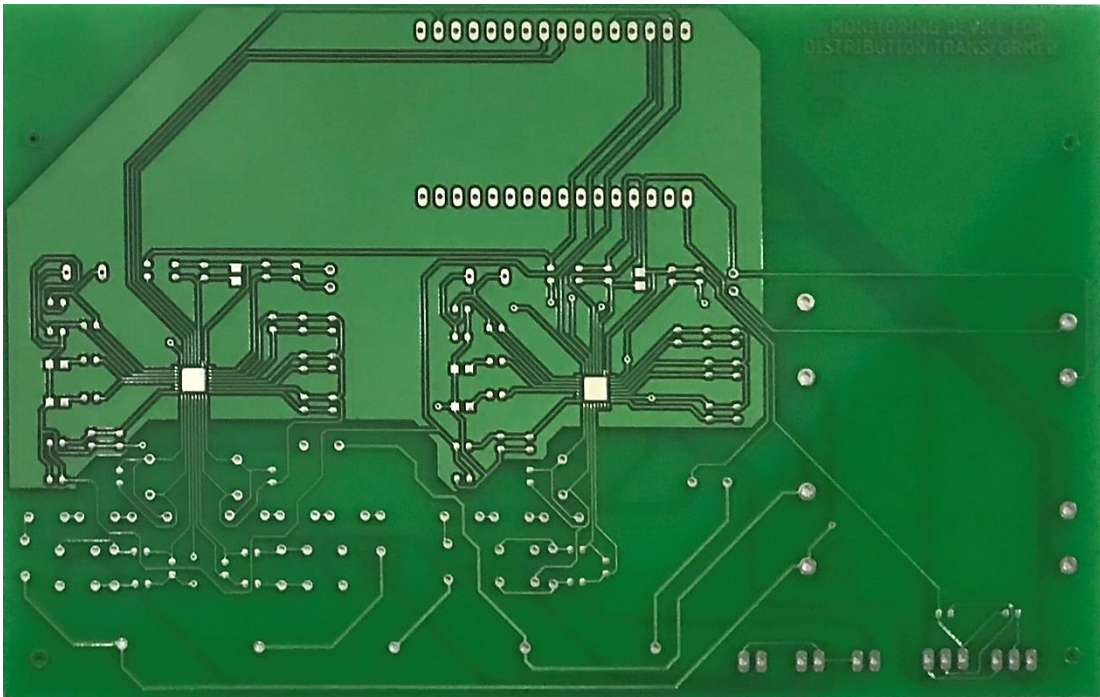
รูปที่ 44 ลายวงจรพิมพ์ด้าน Bottom Layer ของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT

3.4 การพัฒนาอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT

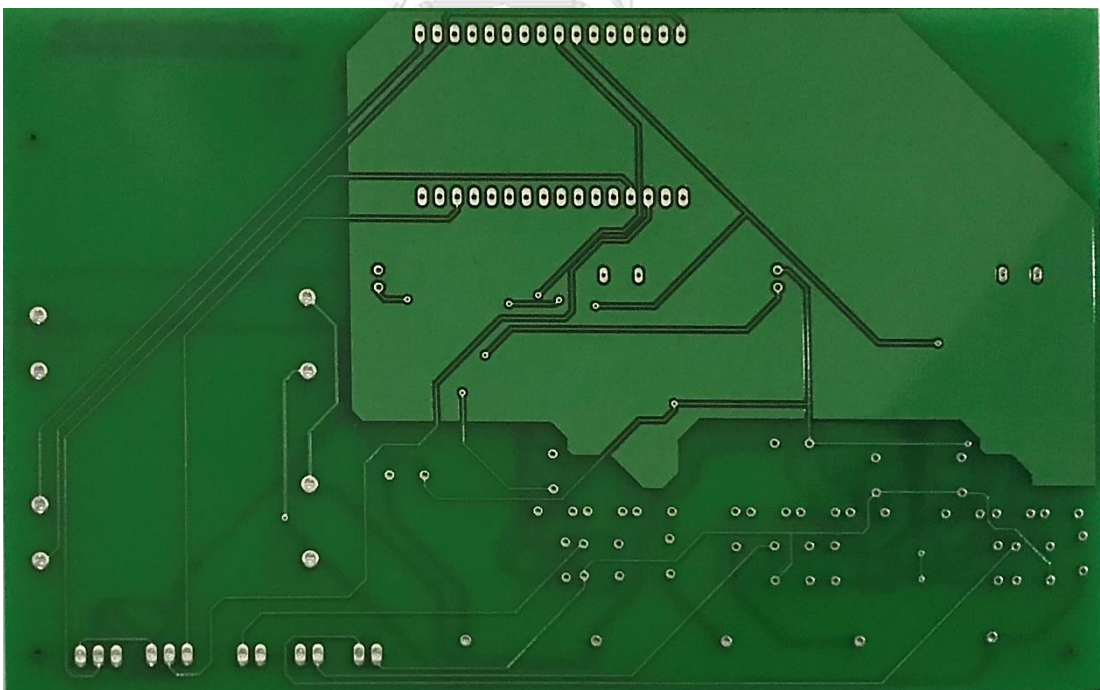
หลังจากการออกแบบลายวงจรพิมพ์เสร็จแล้ว ขั้นตอนต่อมาคือการนำลายวงจรพิมพ์ที่ออกแบบไว้มาสร้างเป็นแผ่นวงจรพิมพ์ของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT

รูปที่ 45 แสดงแผ่นวงจรพิมพ์ด้าน Top Layer ของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT โดยเป็นด้านหลักที่ใช้ยึดอุปกรณ์ทั้งหมดของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT

รูปที่ 46 แสดงแผ่นวงจรพิมพ์ด้าน Bottom Layer ของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT โดยเป็นด้านที่ใช้สำหรับสายสัญญาณอื่น ๆ ของแผ่นวงจรพิมพ์ นอกเหนือจากด้าน Top Layer

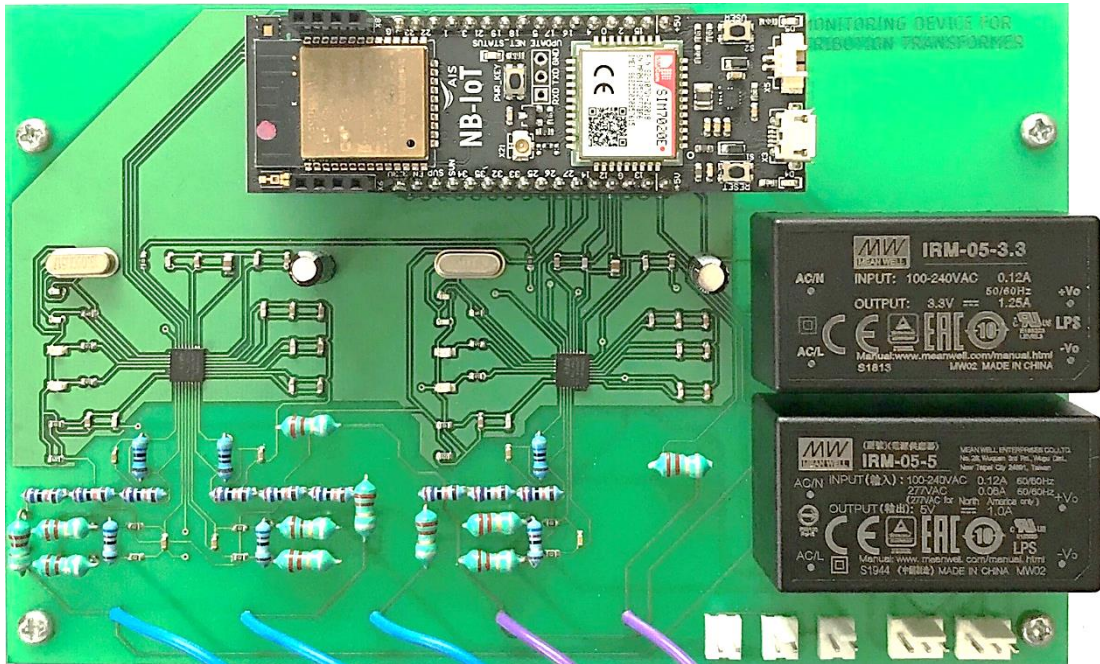


รูปที่ 45 แผ่นวงจรพิมพ์ด้าน Top Layer ของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT



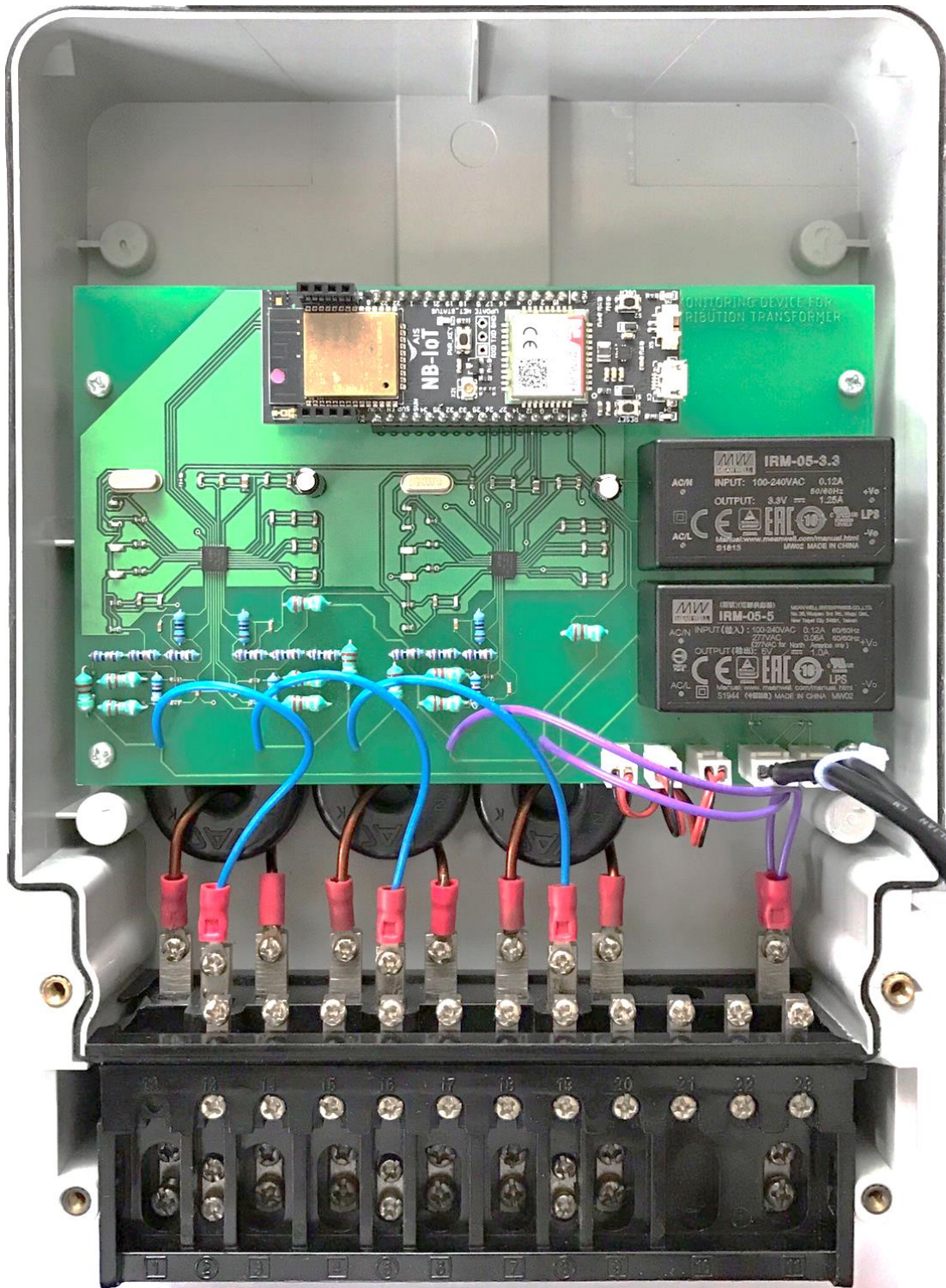
รูปที่ 46 แผ่นวงจรพิมพ์ด้าน Bottom Layer ของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT

จากนั้นทำการประกอบอุปกรณ์ทุกส่วนลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 47



รูปที่ 47 การประกอบอุปกรณ์ลงบนแผ่นวงจรพิมพ์

หลังจากประกอบอุปกรณ์ลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ครบทุกส่วนแล้ว จึงทำการบรรจุแผ่นวงจรพิมพ์ลงกล่อง จากนั้นทำการต่อสายวงจรวัดแรงดันไฟฟ้าและวงจรวัดกระแสไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย โดยการต่อสายวงจรวัดแรงดันไฟฟ้านั้นจะเป็นลักษณะการต่อโดยตรงจากขั้วต่อสาย สำหรับการต่อสายวงจรวัดกระแสไฟฟ้า จะทำการต่อผ่านหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าโดยให้ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าต่อเข้ากับขั้วต่อสายตามทิศทางกระแสไฟฟ้าไหลเข้า-ออกแต่ละเฟส ส่วนด้านทุติยภูมินั้นจะต่อเข้าวงจรวัดกระแสไฟฟ้าของแผ่นวงจรพิมพ์ และต่อชุดเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิชนิดป้องกันน้ำ DS18B20 จำนวน 2 ชุด เพื่อสร้างให้เป็นอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT ดังแสดงในรูปที่ 48



รูปที่ 48 อุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT

บทที่ 4

การออกแบบชุดข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850

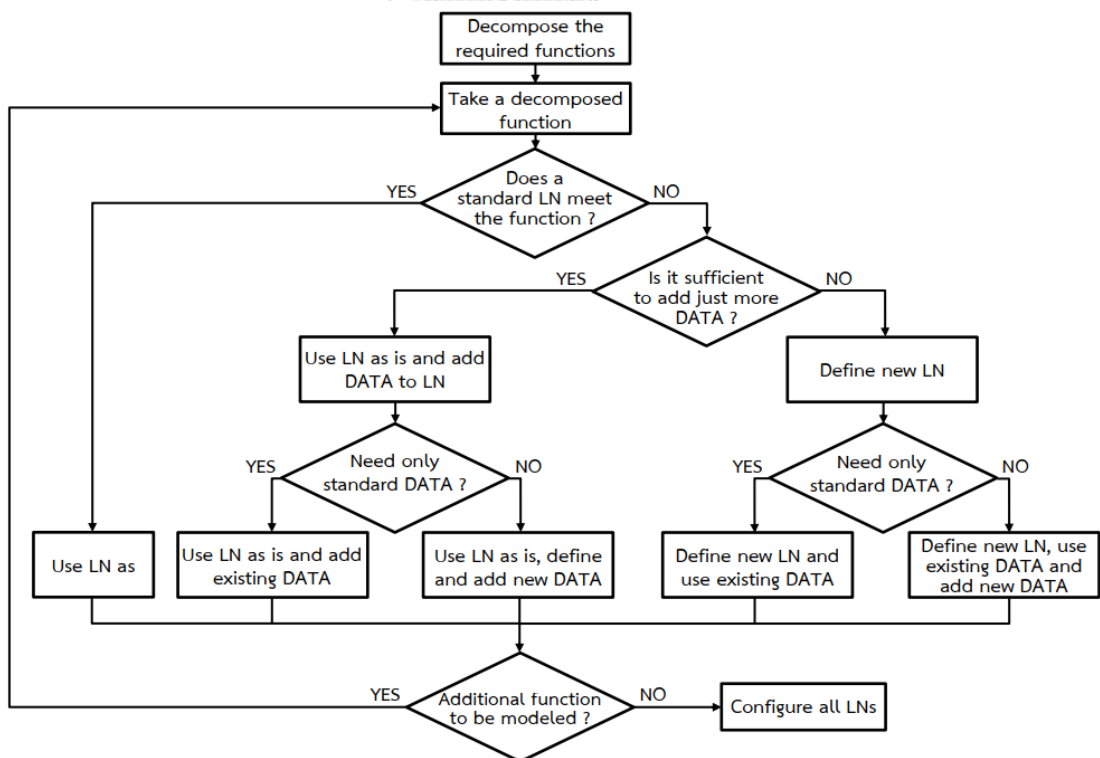
ในบทนี้ จะอธิบายถึง การออกแบบและพัฒนาชุดข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 โดยมีเนื้อหาดังต่อไปนี้

4.1 การออกแบบและพัฒนาชุดข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850

การออกแบบและพัฒนาชุดข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 นั้น สิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาก็คือ การเลือกใช้ Logical Node ให้สอดคล้องกับฟังก์ชันการทำงานของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายที่พัฒนาขึ้น เพื่อให้เกิดความสะดวกต่อการอธิบายชุดข้อมูลเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายตามมาตรฐาน IEC61850 ได้อย่างเหมาะสม

4.1.1 การออกแบบ Logical Node

แนวคิดการออกแบบ Logical Node ตามมาตรฐาน IEC61850 แสดงในรูปที่ 49



รูปที่ 49 แนวคิดการออกแบบ Logical Node

แนวคิดการออกแบบ Logical Node ตามมาตรฐาน IEC61850 นั้น กำหนดให้มีการออกแบบและจำแนกฟังก์ชันการทำงานของอุปกรณ์ก่อน เพื่อทำการเลือก Logical Node ให้ตรงกับการทำงานของอุปกรณ์ อีกทั้งจะสามารถเลือกใช้งาน Data Object ภายในแต่ละ Logical Node ที่เหมาะสมนั้น ๆ เพื่อให้สามารถอธิบายลักษณะของข้อมูลได้อย่างถูกต้อง

อุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายที่พัฒนาขึ้น มีฟังก์ชันการวัดค่าทางไฟฟ้าและอุณหภูมิตำแหน่งครีบบระบายความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ Logical Node ตามมาตรฐาน IEC61850 เพื่อให้สามารถกำหนด Data Object ให้สอดคล้องกับลักษณะของข้อมูลเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายตามมาตรฐาน IEC61850 ดังนี้

- Measurement (MMXU) คือ Logical Node ที่ใช้วัดค่าทางไฟฟ้าระบบ 3 เฟส โดยวิทยานิพนธ์นี้ออกแบบใช้วัดและแสดงค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟารีแอกทีฟ กำลังไฟฟ้าปรากฏ และค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

- Metering 3 Phase (MMTR) คือ Logical Node ที่ใช้วัดค่าพลังงานไฟฟ้าระบบ 3 เฟส โดยวิทยานิพนธ์นี้ออกแบบใช้วัดและแสดงค่าพลังงานไฟฟ้ารวม

- Temperature Sensor (TTMP) คือ Logical Node ที่ใช้แสดงค่าอุณหภูมิเฉพาะจุด โดยวิทยานิพนธ์นี้ออกแบบใช้วัดและแสดงค่าอุณหภูมิตำแหน่งครีบบระบายความร้อนด้านบนและด้านล่างของหม้อแปลงไฟฟ้า

4.1.2 การพัฒนาชุดข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 ของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้า

เมื่อกำหนด Logical Node ให้ตรงกับฟังก์ชันการทำงานของอุปกรณ์ได้แล้ว ขั้นตอนต่อมาก็คือ การเลือกใช้ Data Object ภายในแต่ละ Logical Node ให้สอดคล้องกับข้อมูลการวัดและแสดงค่าตามแต่ละฟังก์ชันการทำงานของอุปกรณ์ อีกทั้งการเลือกใช้ Data Attribute ให้เหมาะสมกับลักษณะของแต่ละข้อมูล ดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 การพัฒนาชุดข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 ของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้า

Logical Device	Logical Node	FC	Data Class		
			Data Object	Data Attribute	
MonitoringDevice1	MMXU1	MX	PhV	mag	f
			A	mag	f
			W	mag	f
			VAr	mag	f
			VA	mag	f
			PF	mag	f
	MMTR1	MX	TotWh	mag	f
	TTMP1	MX	TmpSv1	instMag	
			TmpSv2	instMag	

จากตารางที่ 8 Data Object ในส่วนของ Logical Node “MMXU1” ที่ใช้วัดค่าทางไฟฟ้าระบบ 3 เฟส ซึ่งประกอบด้วย ค่าแรงดันไฟฟ้า (PhV) กระแสไฟฟ้า (A) กำลังไฟฟ้าจริง (W) กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (VAr) กำลังไฟฟ้าปรากฏ (VA) และค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (PF) จะมี Data Attribute แสดงลักษณะของข้อมูลขนาดค่าแอนะล็อก (mag) ที่เป็นค่าทศนิยม (f)

Data Object ในส่วนของ Logical Node “MMTR1” ที่ใช้วัดค่าวัดค่าพลังงานไฟฟ้ารวม 3 เฟส (TotWh) จะมี Data Attribute แสดงลักษณะของข้อมูลขนาดค่าแอนะล็อก (mag) ที่เป็นค่าทศนิยม (f)

Data Object ในส่วนของ Logical Node “TTMP1” ที่ใช้วัดค่าอุณหภูมิเฉพาะจุด (TmpSv) จะมี Data Attribute แสดงลักษณะของข้อมูลขนาดค่าของการวัดแบบทันทีทันใด (instMag)

โดยชุดข้อมูลฟังก์ชันการทำงานของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายตามมาตรฐาน IEC61850 ของวิทยานิพนธ์นี้จำแนกได้ทั้งหมด ดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ชุดข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 ของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้า

No.	MMS (IEC61850)	Phase	Explanation
1	MonitoringDevice1/MMXU1\$MX\$PhV\$phsA\$mag\$f	A	Voltage
2	MonitoringDevice1/MMXU1\$MX\$PhV\$phsB\$mag\$f	B	
3	MonitoringDevice1/MMXU1\$MX\$PhV\$phsC\$mag\$f	C	
4	MonitoringDevice1/MMXU1\$MX\$A\$phsA\$mag\$f	A	Current
5	MonitoringDevice1/MMXU1\$MX\$A\$phsB\$mag\$f	B	
6	MonitoringDevice1/MMXU1\$MX\$A\$phsC\$mag\$f	C	
7	MonitoringDevice1/MMXU1\$MX\$W\$phsA\$mag\$f	A	Real Power
8	MonitoringDevice1/MMXU1\$MX\$W\$phsB\$mag\$f	B	
9	MonitoringDevice1/MMXU1\$MX\$W\$phsC\$mag\$f	C	
10	MonitoringDevice1/MMXU1\$MX\$VAr\$phsA\$mag\$f	A	Reactive Power
11	MonitoringDevice1/MMXU1\$MX\$VAr\$phsB\$mag\$f	B	
12	MonitoringDevice1/MMXU1\$MX\$VAr\$phsC\$mag\$f	C	
13	MonitoringDevice1/MMXU1\$MX\$VA\$phsA\$mag\$f	A	Apparent Power
14	MonitoringDevice1/MMXU1\$MX\$VA\$phsB\$mag\$f	B	
15	MonitoringDevice1/MMXU1\$MX\$VA\$phsC\$mag\$f	C	
16	MonitoringDevice1/MMXU1\$MX\$PF\$phsA\$mag\$f	A	Power Factor
17	MonitoringDevice1/MMXU1\$MX\$PF\$phsB\$mag\$f	B	
18	MonitoringDevice1/MMXU1\$MX\$PF\$phsC\$mag\$f	C	
19	MonitoringDevice1/MMTR1\$MX\$TotWh\$mag\$f	A+B+C	Total Energy
20	MonitoringDevice1/TTMP1\$MX\$TmpSv1\$instMag	-	Top-Fin Temperature
21	MonitoringDevice1/TTMP1\$MX\$TmpSv2\$instMag	-	Bottom-Fin Temperature

บทที่ 5

การออกแบบซอฟต์แวร์ของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายตาม มาตรฐาน IEC61850 ผ่านเครือข่าย NB-IoT

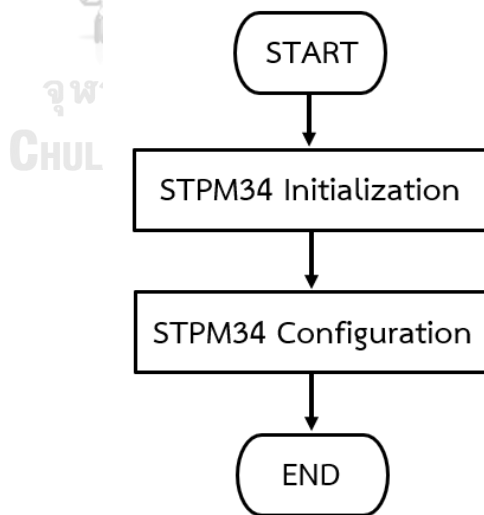
ในบทนี้ จะอธิบายถึง วิธีการออกแบบซอฟต์แวร์ของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายตามมาตรฐาน IEC61850 ผ่านเครือข่าย NB-IoT โดยเนื้อหาในบทนี้จะแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อ ดังนี้

5.1 การออกแบบซอฟต์แวร์ภาคการวัด

5.2 การออกแบบซอฟต์แวร์ส่วน Server

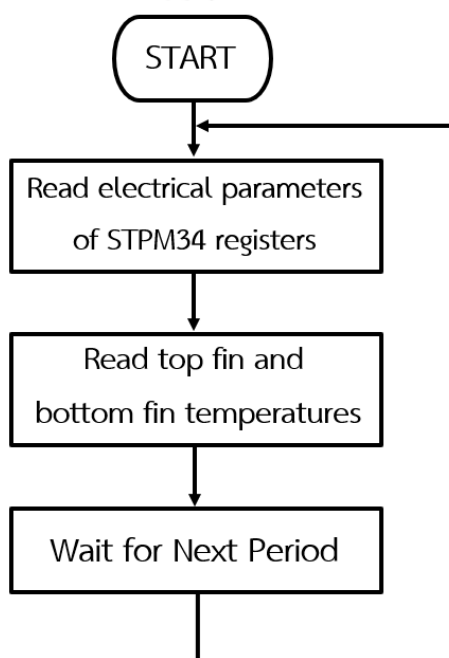
5.1 การออกแบบซอฟต์แวร์ภาคการวัด

การออกแบบซอฟต์แวร์ภาคการวัดค่าทางไฟฟ้าของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ขั้นตอนแรกต้องกำหนดขาสัญญาณสำหรับใช้เชื่อมต่อระหว่างไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 กับชุดหน่วยประมวลผลกลาง Devio NB-Devkit I ตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.2.1 และ 3.2.2 เพื่อกำหนดขาสัญญาณสำหรับการตั้งค่าการทำงานของไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 และทำการเริ่มต้นการทำงานของไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 50



รูปที่ 50 แผนผังการกำหนดค่าเริ่มต้นการทำงานของไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34

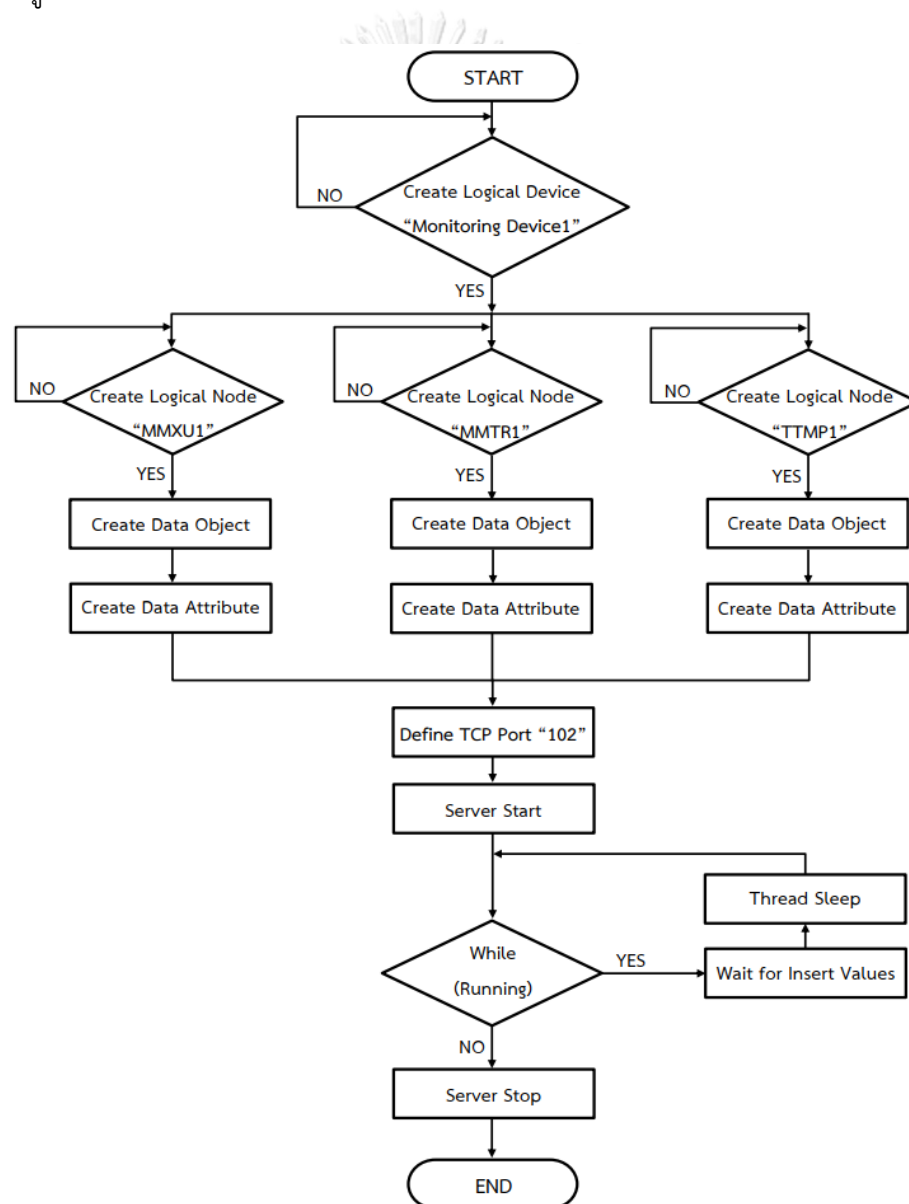
สำหรับการอ่านค่าการวัดของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย เริ่มจากการอ่านค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า ซึ่งเกิดขึ้นผ่านโปรโตคอลการสื่อสารแบบ SPI ตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.2.4 การอ่านค่าทางไฟฟ้าของไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 จำนวน 2 ชุดนั้น เป็นการอ่านค่าจากรีจิสเตอร์ภายในไอซี STPM34 ที่เก็บข้อมูลการวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าเอาไว้ แล้วแปลงให้เป็นค่าการวัดจริงตามสมการทางคณิตศาสตร์ไฟฟ้า จากนั้นทำการอ่านค่าอุณหภูมิครีระบายความร้อนด้านบนและด้านล่างของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ของชุดเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิชนิดป้องกันน้ำ DS18B20 โดยสามารถอ่านค่าอุณหภูมิจากเซ็นเซอร์ DS18B20 ได้โดยตรง เนื่องจากค่าอุณหภูมิที่เซ็นเซอร์ DS18B20 อ่านได้นั้นเป็นค่าดิจิทัลที่มีความเสถียรและแม่นยำ ดังแสดงในรูปที่ 51



รูปที่ 51 แผนผังการอ่านค่าการวัดของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย

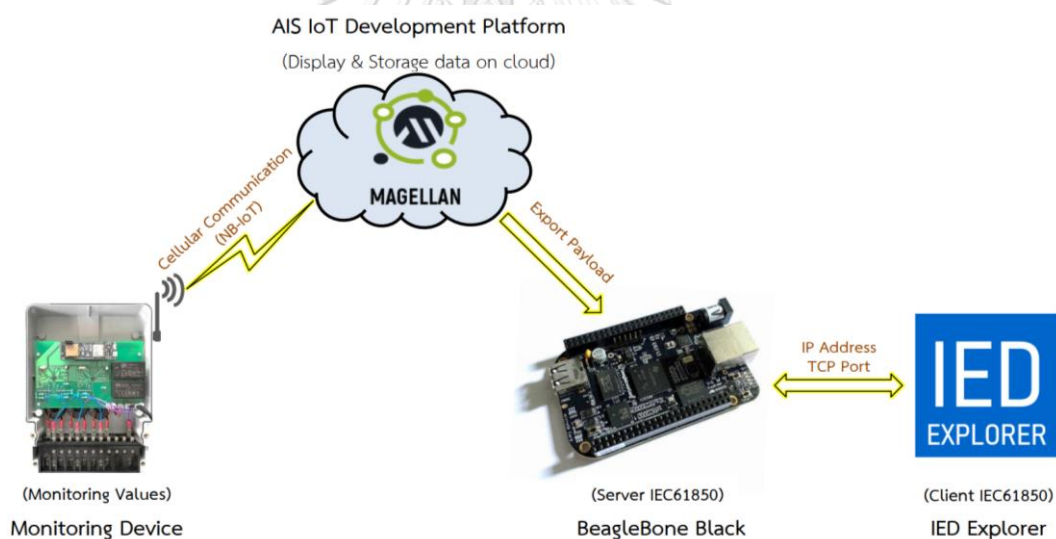
5.2 การออกแบบซอฟต์แวร์ส่วน Server

การออกแบบ Server ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขั้นตอนแรกต้องกำหนด Logical Device ของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย “Monitoring Device1” จากนั้นทำการกำหนด Logical Node ให้สอดคล้องกับฟังก์ชันการทำงานของอุปกรณ์และกำหนด Data Object กับ Data Attribute ให้ตรงกับลักษณะของแต่ละข้อมูล เพื่อสร้างเป็นชุดข้อมูลการเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายที่มีโครงสร้างตามมาตรฐาน IEC61850 ไว้ภายในบอร์ด BeagleBone Black ที่ทำหน้าที่เป็น Server จากนั้นทำการกำหนด TCP Port สำหรับกำหนดช่องทางการติดต่อจาก Client ดังแสดงในรูปที่ 52



รูปที่ 52 การออกแบบซอฟต์แวร์ส่วนเซิร์ฟเวอร์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ออกแบบกระบวนการสื่อสารข้อมูลการเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายตามมาตรฐาน IEC61850 โดยเริ่มจากอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายทำการวัดและส่งค่าข้อมูลการเฝ้าสังเกตผ่านเครือข่าย NB-IoT ซึ่งเป็นเครือข่ายการสื่อสารแบบเซลลูลาร์ขึ้นไปยัง Magellan [23] ที่เป็น AIS IoT Development Platform พื้นฐานสำหรับการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ตามเทคโนโลยี NB-IoT อีกทั้งยังมีพื้นที่จัดเก็บข้อมูลการเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายให้อีกด้วย จากนั้นทำการส่งค่าข้อมูลออกเป็น Payload เพื่อเติมค่าข้อมูลการเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายลงในชุดข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 ที่ออกแบบและพัฒนาไว้บนบอร์ด BeagleBone Black จึงทำให้ Server มีชุดข้อมูลการเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายตามมาตรฐาน IEC61850 ที่สมบูรณ์ สำหรับการทดสอบชุดข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 นั้น ออกแบบให้ใช้ซอฟต์แวร์ IED Explorer [24] ทำหน้าที่เป็น Client เรียกอ่านชุดข้อมูลเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายตามมาตรฐาน IEC61850 จาก Server เพื่อตรวจสอบว่าอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายที่พัฒนาขึ้น สามารถทำงานร่วมกันและชุดข้อมูลที่พัฒนาขึ้นเป็นไปตามมาตรฐาน IEC61850 ดังแสดงในรูปที่ 53



รูปที่ 53 การออกแบบการสื่อสารข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 ผ่านเครือข่าย NB-IoT

บทที่ 6

การทดสอบและผลการทดสอบ

ในบทนี้ จะกล่าวถึง การทดสอบและผลการทดสอบวิทยานิพนธ์ โดยเนื้อหาในบทนี้จะแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อดังนี้

6.1 การทดสอบการวัดของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT

6.2 การทดสอบข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850

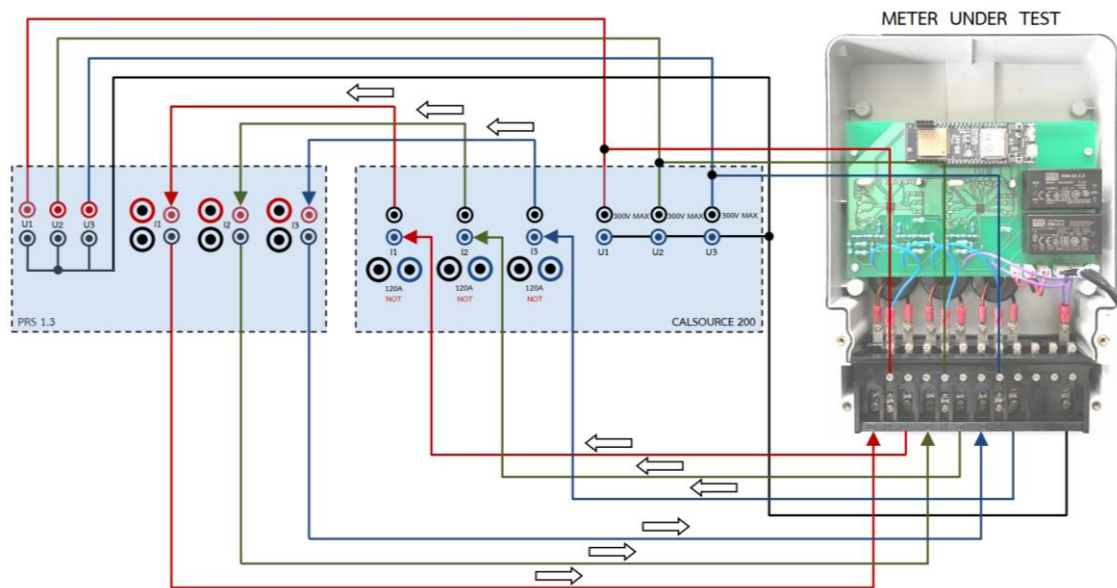
6.1 การทดสอบการวัดของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านเครือข่าย NB-IoT

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้กำหนดการทดสอบตามมาตรฐาน IEC62053-22 [25] ซึ่งเป็นการทดสอบมาตรฐานอุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า สำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้าระดับแรงดันต่ำ (ไม่เกิน 1,000 โวลต์) Class 0.5S ของอุปกรณ์ 3 เฟส 4 สาย ที่ติดตั้งประกอบหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าด้านแรงต่ำ โดยมีข้อกำหนดตามหลักเกณฑ์การทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าใช้งานปกติ (I_n) 5 A ค่ากระแสไฟฟ้าใช้งานสูงสุด (I_{max}) 6 A และค่าแรงดันไฟฟ้า 230 V ที่ความถี่ 50 Hz ดังแสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ข้อกำหนดหลักเกณฑ์การทดสอบตามมาตรฐาน IEC62053-22 Class 0.5S

Values of Current	Power Factor	Percentage Error Limits Class 0.5S
$0.01I_n \leq I < 0.05I_n$	1	± 1.0
$0.05I_n \leq I \leq I_{max}$	1	± 0.5
$0.02I_n \leq I < 0.1I_n$	0.5 Inductive	± 1.0
	0.8 Capacitive	± 1.0
$0.1I_n \leq I \leq I_{max}$	0.5 Inductive	± 0.6
	0.8 Capacitive	± 0.6
$0.1I_n \leq I \leq I_{max}$	0.25 Inductive	± 1.0
	0.5 Capacitive	± 1.0

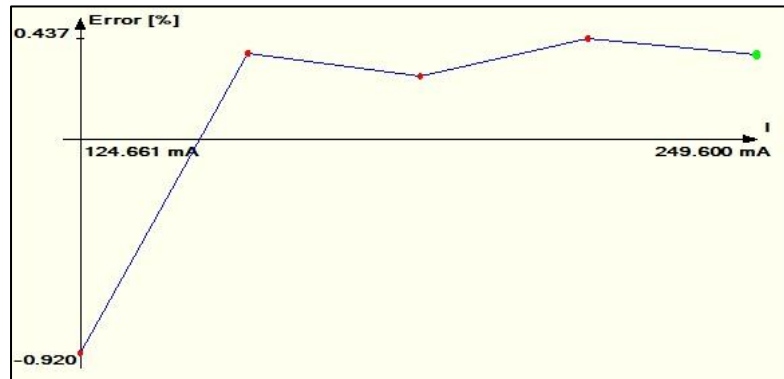
การทดสอบการวัดค่าทางไฟฟ้าใช้ CALSOURCE 200 เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่สามารถกำหนดขนาดและมุมเฟสของแรงดันและกระแสไฟฟ้าได้ ร่วมกับมิเตอร์อ้างอิง PRS1.3 จากบริษัท MTE Meter Test Equipment เพื่อทำการทดสอบและสอบเทียบอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEC62053-22 โดยการต่อวงจรการทดสอบการวัดค่าทางไฟฟ้าของวิทยานิพนธ์นี้ แสดงดังในรูปที่ 54



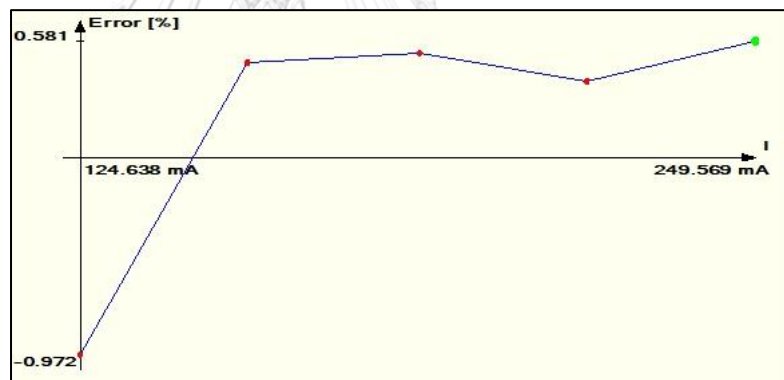
รูปที่ 54 การต่อวงจรการทดสอบการวัดค่าทางไฟฟ้า

6.1.1 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.01I_n \leq I < 0.05I_n$ ที่ตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1

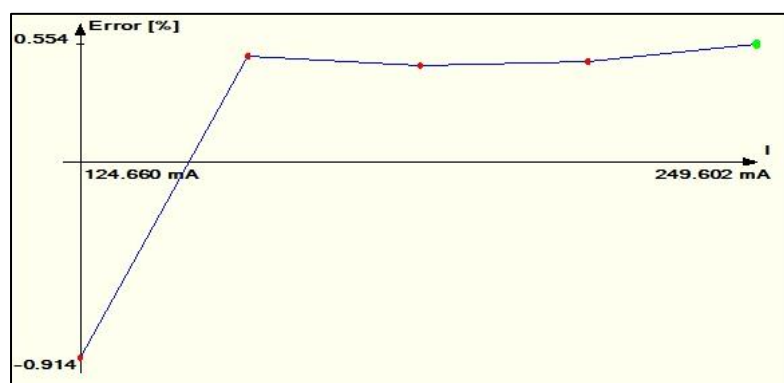
ค่าความผิดพลาดสูงสุดของเฟส L_1 L_2 และ L_3 เท่ากับ -0.920% -0.972% และ -0.914% ตามลำดับ ซึ่งผ่านข้อกำหนดตามหลักเกณฑ์การทดสอบความผิดพลาดไม่เกิน $\pm 1.0\%$



รูปที่ 55 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.01I_n \leq I < 0.05I_n$ ที่ P.F. 1.0 เฟส L_1



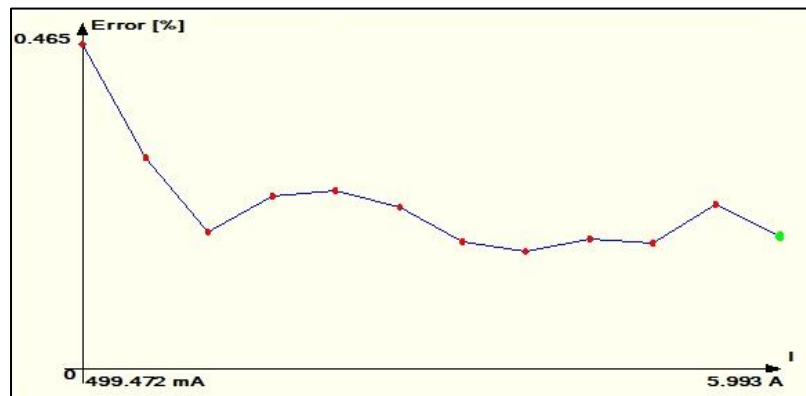
รูปที่ 56 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.01I_n \leq I < 0.05I_n$ ที่ P.F. 1.0 เฟส L_2



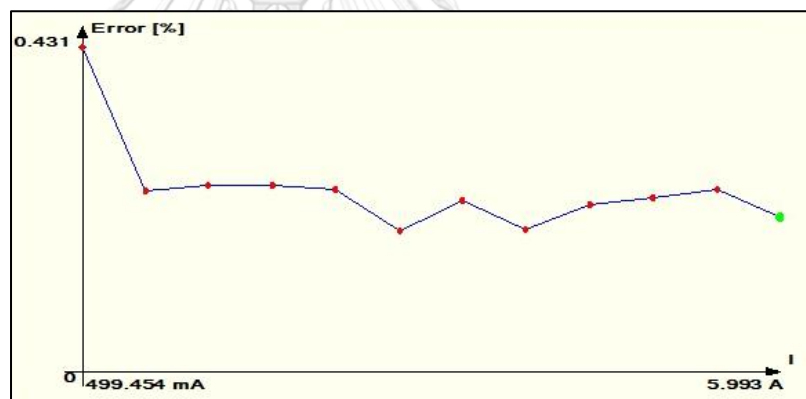
รูปที่ 57 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.01I_n \leq I < 0.05I_n$ ที่ P.F. 1.0 เฟส L_3

6.1.2 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.05I_n \leq I \leq I_{max}$ ที่ตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1

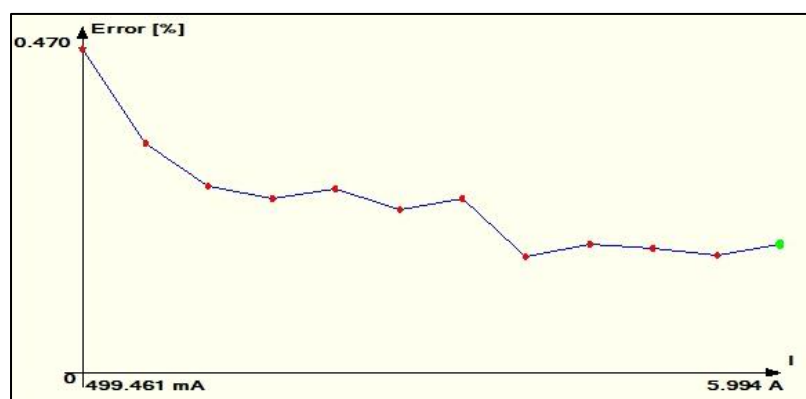
ค่าความผิดพลาดสูงสุดของเฟส L_1 L_2 และ L_3 เท่ากับ 0.465% 0.431% และ 0.470% ตามลำดับ ซึ่งผ่านข้อกำหนดตามหลักเกณฑ์การทดสอบความผิดพลาดไม่เกิน $\pm 0.5\%$



รูปที่ 58 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.05I_n \leq I \leq I_{max}$ ที่ P.F. 1.0 เฟส L_1



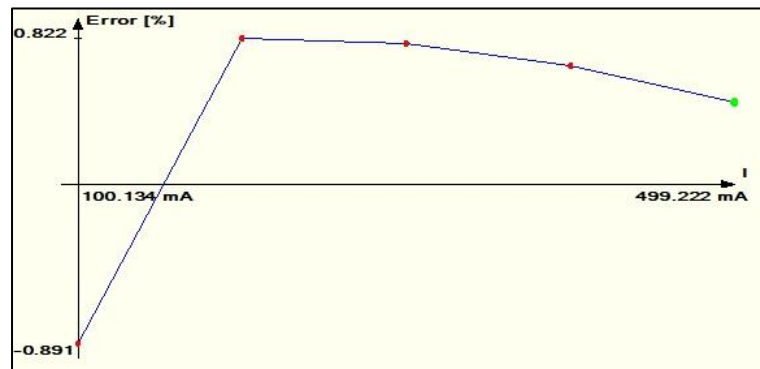
รูปที่ 59 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.05I_n \leq I \leq I_{max}$ ที่ P.F. 1.0 เฟส L_2



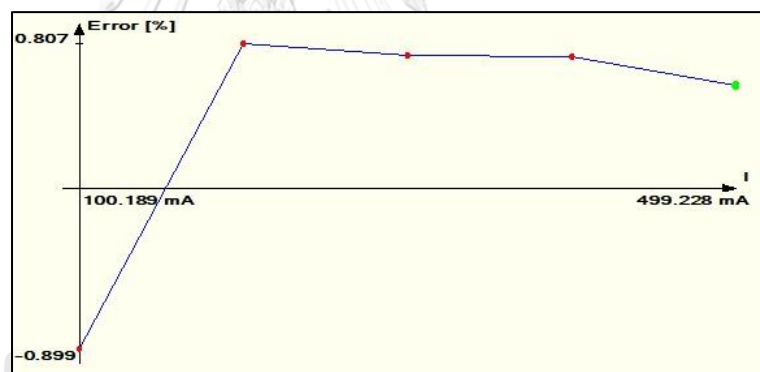
รูปที่ 60 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.05I_n \leq I \leq I_{max}$ ที่ P.F. 1.0 เฟส L_3

6.1.3 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.02I_n \leq I < 0.1I_n$ ที่ตัวประกอบกำลัง 0.5 ล้าหลัง

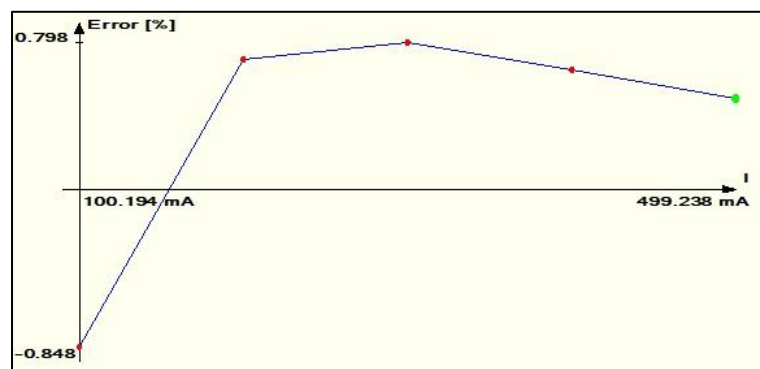
ค่าความผิดพลาดสูงสุดของเฟส L_1 L_2 และ L_3 เท่ากับ -0.891% -0.899% และ -0.848% ตามลำดับ ซึ่งผ่านข้อกำหนดตามหลักเกณฑ์การทดสอบความผิดพลาดไม่เกิน $\pm 1.0\%$



รูปที่ 61 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.02I_n \leq I < 0.1I_n$ P.F. 0.5 ล้าหลังเฟส L_1



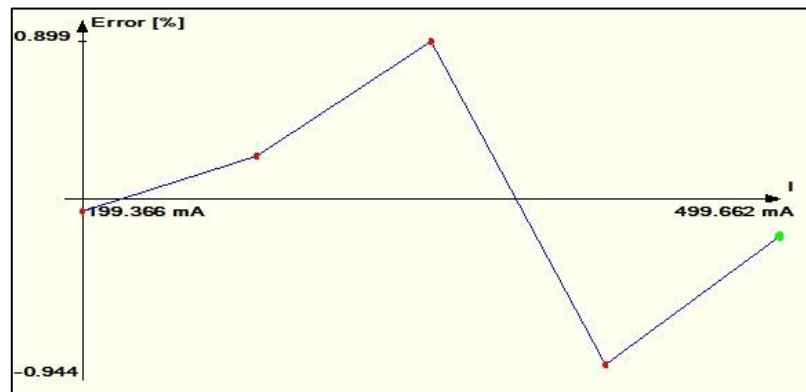
รูปที่ 62 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.02I_n \leq I < 0.1I_n$ P.F. 0.5 ล้าหลังเฟส L_2



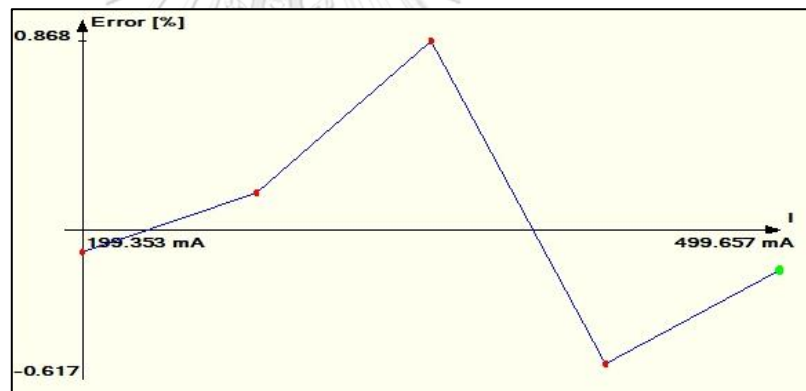
รูปที่ 63 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.02I_n \leq I < 0.1I_n$ P.F. 0.5 ล้าหลังเฟส L_3

6.1.4 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.02I_n \leq I < 0.1I_n$ ที่ตัวประกอบกำลัง 0.8 นำหน้า

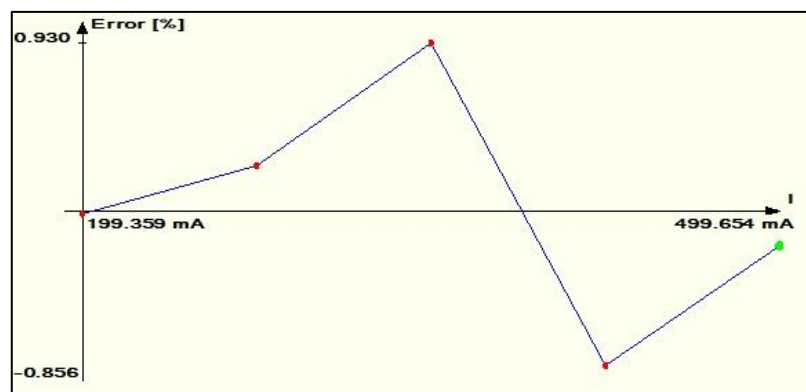
ค่าความผิดพลาดสูงสุดของเฟส L_1 L_2 และ L_3 เท่ากับ -0.944% 0.868% และ 0.930% ตามลำดับ ซึ่งผ่านข้อกำหนดตามหลักเกณฑ์การทดสอบความผิดพลาดไม่เกิน $\pm 1.0\%$



รูปที่ 64 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.02I_n \leq I < 0.1I_n$ P.F. 0.8 นำหน้าเฟส L_1



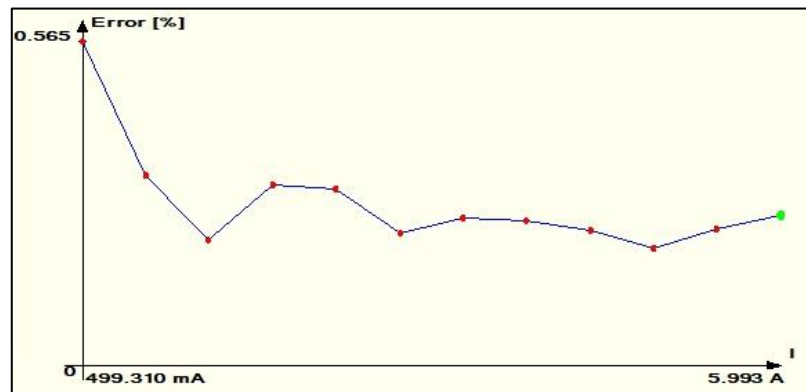
รูปที่ 65 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.02I_n \leq I < 0.1I_n$ P.F. 0.8 นำหน้าเฟส L_2



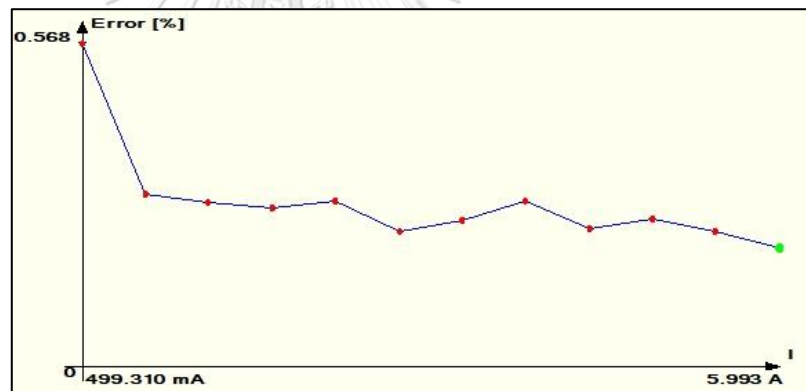
รูปที่ 66 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.02I_n \leq I < 0.1I_n$ P.F. 0.8 นำหน้าเฟส L_3

6.1.5 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.1I_n \leq I \leq I_{max}$ ที่ตัวประกอบกำลัง 0.5 ล้าหลัง

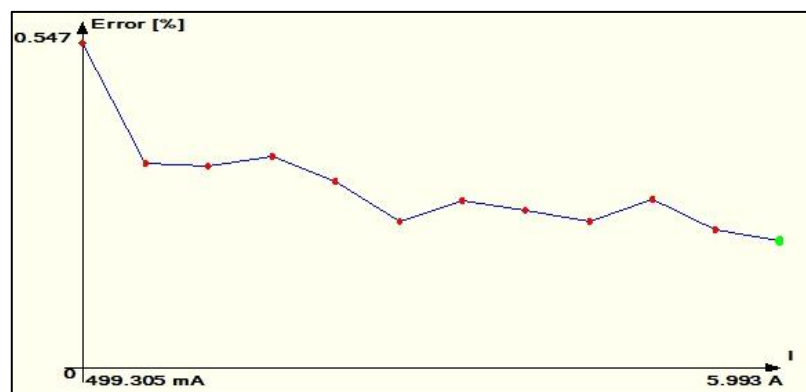
ค่าความผิดพลาดสูงสุดของเฟส L_1 L_2 และ L_3 เท่ากับ 0.565% 0.568% และ 0.547% ตามลำดับ ซึ่งผ่านข้อกำหนดตามหลักเกณฑ์การทดสอบความผิดพลาดไม่เกิน $\pm 0.6\%$



รูปที่ 67 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.1I_n \leq I \leq I_{max}$ P.F. 0.5 ล้าหลังเฟส L_1

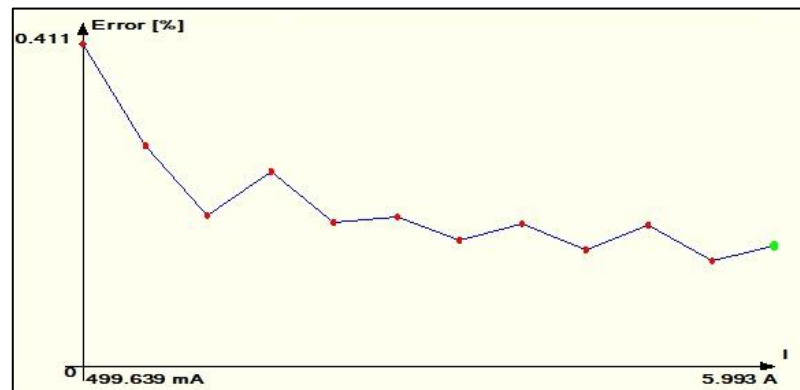


รูปที่ 68 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.1I_n \leq I \leq I_{max}$ P.F. 0.5 ล้าหลังเฟส L_2

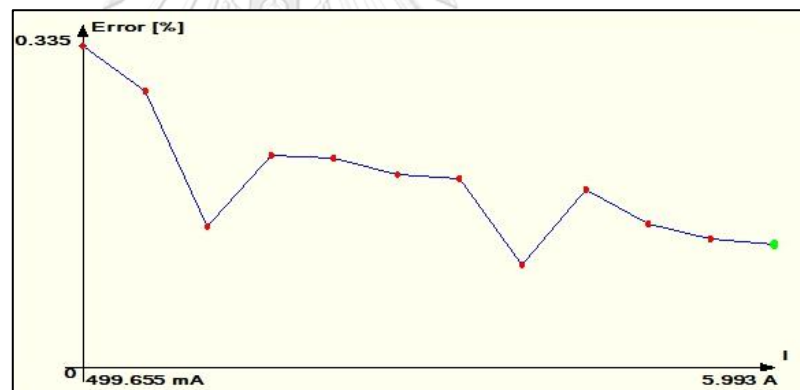


6.1.6 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.1I_n \leq I \leq I_{max}$ ที่ตัวประกอบกำลัง 0.8 นำหน้า

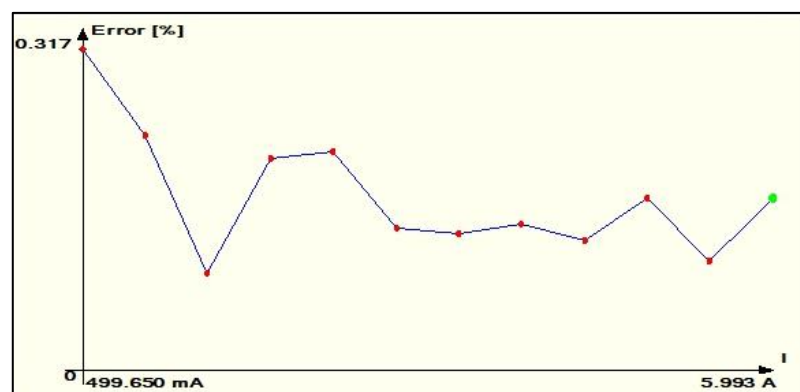
ค่าความผิดพลาดสูงสุดของเฟส L_1 L_2 และ L_3 เท่ากับ 0.411% 0.335% และ 0.317% ตามลำดับ ซึ่งผ่านข้อกำหนดตามหลักเกณฑ์การทดสอบความผิดพลาดไม่เกิน $\pm 0.6\%$



รูปที่ 70 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.1I_n \leq I \leq I_{max}$ P.F. 0.8 นำหน้าเฟส L_1



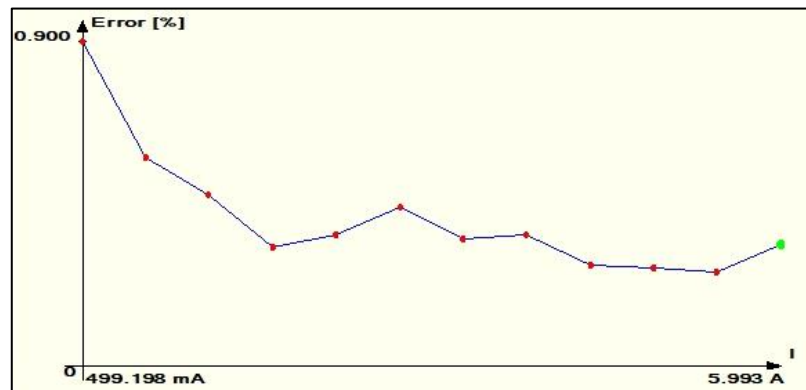
รูปที่ 71 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.1I_n \leq I \leq I_{max}$ P.F. 0.8 นำหน้าเฟส L_2



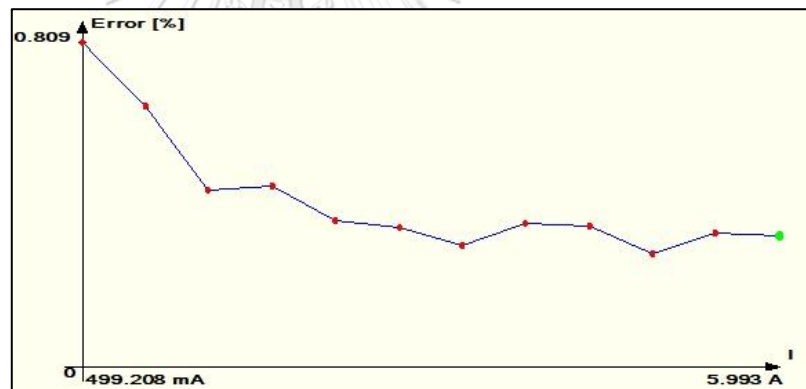
รูปที่ 72 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.1I_n \leq I \leq I_{max}$ P.F. 0.8 นำหน้าเฟส L_3

6.1.7 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.1I_n \leq I \leq I_{max}$ ที่ตัวประกอบกำลัง 0.25 ล้าหลัง

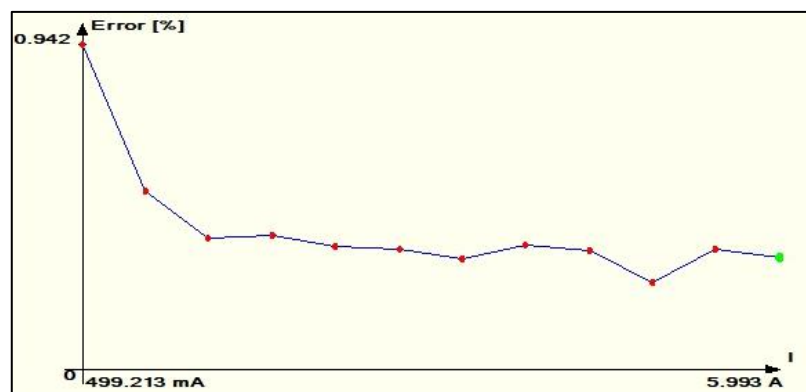
ค่าความผิดพลาดสูงสุดของเฟส L_1 L_2 และ L_3 เท่ากับ 0.900% 0.809% และ 0.942% ตามลำดับ ซึ่งผ่านข้อกำหนดตามหลักเกณฑ์การทดสอบความผิดพลาดไม่เกิน $\pm 1.0\%$



รูปที่ 73 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.1I_n \leq I \leq I_{max}$ P.F. 0.25 ล้าหลังเฟส L_1



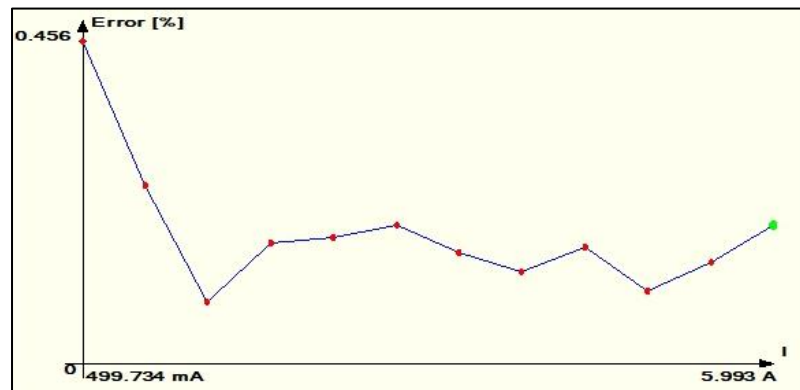
รูปที่ 74 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.1I_n \leq I \leq I_{max}$ P.F. 0.25 ล้าหลังเฟส L_2



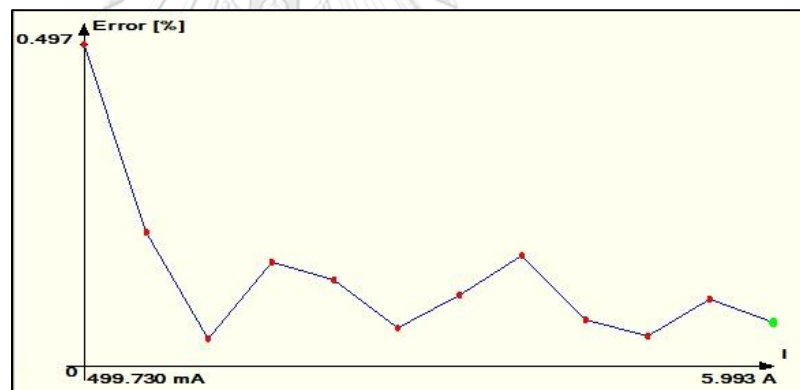
รูปที่ 75 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.1I_n \leq I \leq I_{max}$ P.F. 0.25 ล้าหลังเฟส L_3

6.1.8 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.1I_n \leq I \leq I_{max}$ ที่ตัวประกอบกำลัง 0.5 นำหน้า

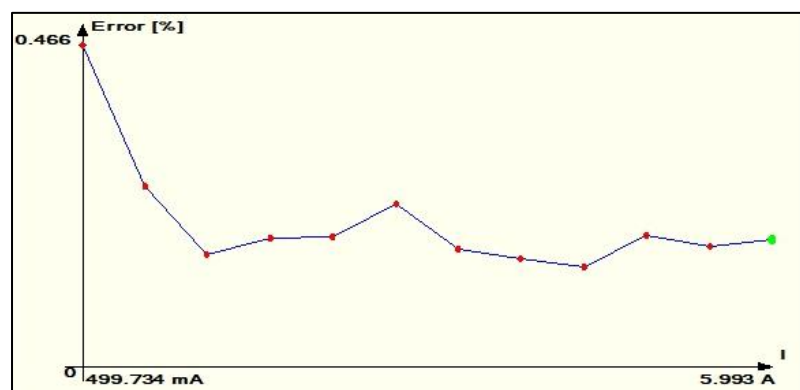
ค่าความผิดพลาดสูงสุดของเฟส L_1 L_2 และ L_3 เท่ากับ 0.456% 0.497% และ 0.466% ตามลำดับ ซึ่งผ่านข้อกำหนดตามหลักเกณฑ์การทดสอบความผิดพลาดไม่เกิน $\pm 1.0\%$



รูปที่ 76 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.1I_n \leq I \leq I_{max}$ P.F. 0.5 นำหน้าเฟส L_1



รูปที่ 77 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.1I_n \leq I \leq I_{max}$ P.F. 0.5 นำหน้าเฟส L_2



รูปที่ 78 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้า $0.1I_n \leq I \leq I_{max}$ P.F. 0.5 นำหน้าเฟส L_3

6.2 การทดสอบชุดข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850

การออกแบบและพัฒนาชุดข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 นั้น สิ่งสำคัญที่สุดคือต้องทำการทดสอบชุดข้อมูลที่พัฒนาขึ้น เพื่อให้มั่นใจว่าเป็นไปตามการอ้างอิงชื่อข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบให้ใช้ซอฟต์แวร์ IED Explorer [24] ทำหน้าที่เป็น Client เรียกว่าชุดข้อมูลเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายตามมาตรฐาน IEC61850 จาก BeagleBone Black ที่ทำหน้าที่เป็น Server เพื่อตรวจสอบว่าอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานร่วมกันและชุดข้อมูลที่พัฒนาขึ้นเป็นไปตามมาตรฐาน IEC61850

6.2.1 การทดสอบการเชื่อมต่อการสื่อสารตามมาตรฐาน IEC61850

การทดสอบการเชื่อมต่อการสื่อสารตามมาตรฐาน IEC61850 กับซอฟต์แวร์ IED Explorer นั้น เริ่มจากการตั้งค่าพารามิเตอร์เชื่อมต่อการสื่อสาร ISO Connection Parameters โดยกำหนดตำแหน่ง Hostname/IP Address ให้ตรงกับ Server คือ 192.168.7.2 และ TCP Port เป็น 102 และกำหนดรหัสผ่าน ดังแสดงในรูปที่ 79

รูปที่ 79 การตั้งค่าพารามิเตอร์การเชื่อมต่อ ISO Connection Parameters

กรณีที่กำหนดตำแหน่ง Hostname/IP Address, TCP Port และรหัสผ่านถูกต้อง ซอฟต์แวร์ IED Explorer ที่ทำหน้าที่เป็น Client จะสามารถเชื่อมต่อการสื่อสารกับ Server ได้ โดยผลการเชื่อมต่อการสื่อสารจะแสดงในส่วน LogView ดังในรูปที่ 80

```

LogView
Info
[9/11/2563 21:42:23.323] Information: Starting main program ...
[9/11/2563 21:42:23.349] Information: Verbosity selected: Information
[9/11/2563 21:42:57.547] Information: Starting new communication, hostname = 192.168.7.2, port = 102.
[9/11/2563 21:42:57.556] Information: [TCP_STATE_START]
[9/11/2563 21:42:57.572] Information: ConnectCallback: Socket connected to 192.168.7.2:102
[9/11/2563 21:42:57.575] Information: [OSI_CONNECT_COTP]
[9/11/2563 21:42:57.584] Information: [OSI_CONNECT_PRES]
[9/11/2563 21:42:57.627] Information: Services Supported: status.getNameList.identify.read.write.getVariableAccessAttributes.defineNamedVariableList.getName
[9/11/2563 21:42:57.627] Information: [IEC61850_STATE_START] (Send IdentifyRequest)
[9/11/2563 21:42:57.665] Information: Received Identify: libiec61850.com, LIBIEC61850, 1.4.2
[9/11/2563 21:42:57.680] Information: Reading domain (LD) names: [IEC61850_READ_NAMELIST_DOMAIN]
[9/11/2563 21:42:57.680] Information: Reading variable names: [IEC61850_READ_NAMELIST_VAR]
[9/11/2563 21:42:57.692] Information: Reading variable specifications: [IEC61850_READ_ACCESSAT_VAR]
[9/11/2563 21:42:57.777] Information: Reading variable values: [IEC61850_READ_MODEL_DATA]
[9/11/2563 21:42:57.862] Information: Reading named variable lists: [IEC61850_READ_NAMELIST_NAMED_VARIABLE_LIST]
[9/11/2563 21:42:57.870] Information: Reading variable lists attributes: [IEC61850_READ_ACCESSAT_NAMED_VARIABLE_LIST]
[9/11/2563 21:42:57.871] Information: Init end: [IEC61850_FREILAUF]

```

รูปที่ 80 ซอฟต์แวร์ IED Explorer สามารถเชื่อมต่อการสื่อสารกับ Server ได้

สำหรับกรณีที่กำหนดตำแหน่ง Hostname/IP Address หรือ TCP Port หรือ รหัสผ่านไม่ถูกต้อง ซอฟต์แวร์ IED Explorer ที่ทำหน้าที่เป็น Client จะไม่สามารถเชื่อมต่อ การสื่อสารกับ Server ได้ โดยผลการเชื่อมต่อการสื่อสารจะแสดงในส่วน LogView ดังใน รูปที่ 81

```

LogView
Info
[9/11/2563 21:46:16.739] Information: Starting main program ...
[9/11/2563 21:46:16.750] Information: Verbosity selected: Information
[9/11/2563 21:46:29.530] Information: Starting new communication, hostname = 192.168.7.2, port = 102.
[9/11/2563 21:46:29.539] Information: [TCP_STATE_START]
[9/11/2563 21:46:29.547] Information: ConnectCallback: Socket connected to 192.168.7.2:102
[9/11/2563 21:46:29.548] Information: [OSI_CONNECT_COTP]
[9/11/2563 21:46:29.562] Information: [OSI_CONNECT_PRES]
[9/11/2563 21:46:29.583] Error: Socket disconnected (detected in ReceiveCallback)
[9/11/2563 21:46:30.082] Information: [TCP_STATE_SHUTDOWN]
[9/11/2563 21:46:30.084] Information: Communication to hostname = 192.168.7.2, port = 102 stopped.

```

รูปที่ 81 ซอฟต์แวร์ IED Explorer ไม่สามารถเชื่อมต่อการสื่อสารกับ Server

6.2.2 การทดสอบชุดข้อมูลเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายตามมาตรฐาน IEC61850

หลังจากที่ซอฟต์แวร์ IED Explorer สามารถเชื่อมต่อการสื่อสารกับ Server ของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายได้แล้ว จะสามารถแสดงชุดข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 ที่พัฒนาขึ้น ซึ่งโครงสร้างของข้อมูลจะมีลักษณะแบ่งเป็น 2 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 82 และรูปที่ 83



รูปที่ 82 ชุดข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 ของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย
ในมุมมองของ ledTreeView

จากรูปที่ 82 แสดงชื่อข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 ของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายในมุมมองของ ledTreeView ที่มีโครงสร้างมุมมองข้อมูลแบบต้นไม้ โดยสามารถแตกแขนงชุดข้อมูลของ Logical Device ตามแต่ละ Logical Node ซึ่งยังสามารถแยกออกได้ 2 แบบ ดังนี้

- IED View (MMS) แสดงโครงสร้างชื่อข้อมูล MMS ตามมาตรฐาน IEC61850 ที่แตกแขนงชุดข้อมูลของ Logical Device ตามแต่ละ Logical Node โดยภายใน Logical Node ใ้ระบุ Function Constraint (FC) ที่สอดคล้องกับฟังก์ชันการทำงานของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย

- IEC View (61850) แสดงโครงสร้างชื่อข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 ที่แตกแขนงชุดข้อมูลของ Logical Device ตามแต่ละ Logical Node โดยภายใน Logical Node ได้รับข้อมูล Data Object (DO) ให้สอดคล้องกับข้อมูลการวัดและแสดงค่าตามแต่ละฟังก์ชันการทำงานของอุปกรณ์ และระบุ Data Attribute (DA) ให้เหมาะสมกับลักษณะของแต่ละข้อมูลอีกด้วย

Name	Type	Value	Communication Address
iecMonitoringDevice1	IEExplorer.Nod...		Dom = MonitoringDevice1 Var =
----- CHILD NODES -----			
MonitoringDevice1/MMTR1.TotWh.mag.f	floating_point	216.97	Dom = MonitoringDevice1 Var = MMTR1\$MX\$TotWh\$mag\$f
MonitoringDevice1/MMXU1.A.phsA.mag.f	floating_point	2.51	Dom = MonitoringDevice1 Var = MMXU1\$MX\$A\$phsA\$mag\$f
MonitoringDevice1/MMXU1.A.phsB.mag.f	floating_point	2.54	Dom = MonitoringDevice1 Var = MMXU1\$MX\$A\$phsB\$mag\$f
MonitoringDevice1/MMXU1.A.phsC.mag.f	floating_point	2.52	Dom = MonitoringDevice1 Var = MMXU1\$MX\$A\$phsC\$mag\$f
MonitoringDevice1/MMXU1.PhV.phsA.mag.f	floating_point	228.97	Dom = MonitoringDevice1 Var = MMXU1\$MX\$PhV\$phsA\$mag\$f
MonitoringDevice1/MMXU1.PhV.phsB.mag.f	floating_point	231.89	Dom = MonitoringDevice1 Var = MMXU1\$MX\$PhV\$phsB\$mag\$f
MonitoringDevice1/MMXU1.PhV.phsC.mag.f	floating_point	229.82	Dom = MonitoringDevice1 Var = MMXU1\$MX\$PhV\$phsC\$mag\$f
MonitoringDevice1/MMXU1.W.phsA.mag.f	floating_point	284.96	Dom = MonitoringDevice1 Var = MMXU1\$MX\$W\$phsA\$mag\$f
MonitoringDevice1/MMXU1.W.phsB.mag.f	floating_point	290.87	Dom = MonitoringDevice1 Var = MMXU1\$MX\$W\$phsB\$mag\$f
MonitoringDevice1/MMXU1.W.phsC.mag.f	floating_point	285.77	Dom = MonitoringDevice1 Var = MMXU1\$MX\$W\$phsC\$mag\$f
MonitoringDevice1/MMXU1.VAr.phsA.mag.f	floating_point	490.94	Dom = MonitoringDevice1 Var = MMXU1\$MX\$VAr\$phsA\$mag\$f
MonitoringDevice1/MMXU1.VAr.phsB.mag.f	floating_point	505.77	Dom = MonitoringDevice1 Var = MMXU1\$MX\$VAr\$phsB\$mag\$f
MonitoringDevice1/MMXU1.VAr.phsC.mag.f	floating_point	501.6	Dom = MonitoringDevice1 Var = MMXU1\$MX\$VAr\$phsC\$mag\$f
MonitoringDevice1/MMXU1.VA.phsA.mag.f	floating_point	572.93	Dom = MonitoringDevice1 Var = MMXU1\$MX\$VA\$phsA\$mag\$f
MonitoringDevice1/MMXU1.VA.phsB.mag.f	floating_point	579.74	Dom = MonitoringDevice1 Var = MMXU1\$MX\$VA\$phsB\$mag\$f
MonitoringDevice1/MMXU1.VA.phsC.mag.f	floating_point	578.54	Dom = MonitoringDevice1 Var = MMXU1\$MX\$VA\$phsC\$mag\$f
MonitoringDevice1/MMXU1.PF.phsA.mag.f	floating_point	0.5	Dom = MonitoringDevice1 Var = MMXU1\$MX\$PF\$phsA\$mag\$f
MonitoringDevice1/MMXU1.PF.phsB.mag.f	floating_point	0.5	Dom = MonitoringDevice1 Var = MMXU1\$MX\$PF\$phsB\$mag\$f
MonitoringDevice1/MMXU1.PF.phsC.mag.f	floating_point	0.5	Dom = MonitoringDevice1 Var = MMXU1\$MX\$PF\$phsC\$mag\$f
MonitoringDevice1/TTMP1.TmpSv1.instMag	floating_point	70.97	Dom = MonitoringDevice1 Var = TTMP1\$MX\$TmpSv1\$instMag
MonitoringDevice1/TTMP1.TmpSv2.instMag	floating_point	55.96	Dom = MonitoringDevice1 Var = TTMP1\$MX\$TmpSv2\$instMag

รูปที่ 83 ชุดข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 ของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย
ในมุมมองของ ledDataView

จากรูปที่ 83 แสดงชื่อข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 ในมุมมองของ ledDataView ที่ระบุชื่อของข้อมูล ชนิดของข้อมูล และค่าของข้อมูลทั้งหมดของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ตามที่ได้ออกแบบและพัฒนาชุดข้อมูลไว้ในบทที่ 4 ตารางที่ 9

จากผลการทดสอบการเชื่อมต่อการสื่อสารของอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายที่พัฒนาขึ้น กับซอฟต์แวร์ IED Explorer ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่มีใช้งานอยู่จริงอย่างแพร่หลาย สำหรับใช้ทดสอบการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะตามมาตรฐาน IEC61850 พบว่าอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานร่วมกันได้กับซอฟต์แวร์ IED Explorer ขณะที่ชุดข้อมูลเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายที่พัฒนาขึ้นเป็นไปตามมาตรฐาน IEC61850

บทที่ 7

บทสรุปผลงานวิจัย

ในบทสุดท้ายนี้ จะกล่าวถึง บทสรุปผลงานวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับ และข้อเสนอแนะของงานวิจัยเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงต่อไป ดังนี้

7.1 บทสรุปของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดวัตถุประสงค์ เพื่อพัฒนาอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ระบบ 22 kv 3 เฟส 4 สาย 400/230 V ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และเพื่อศึกษาแนวทางการพัฒนาการสื่อสารข้อมูลการเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายตามมาตรฐาน IEC61850 ซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการรับส่งข้อมูลสูง ผ่านเครือข่าย NB-IoT ที่มีแถบความกว้างข้อมูลต่ำ โดยในส่วนของพัฒนาอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายนั้น ได้กำหนดย่านการวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าตามพิกัดด้านหัตถิยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ระบบ 22 kv 3 เฟส 4 สาย 400/230 V เพื่อทำการออกแบบวงจรระดับแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 ทำให้สามารถวัดค่าทางไฟฟ้าด้านหัตถิยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้อย่างเหมาะสม และทำการทดสอบการวัดของอุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEC62053-22 ซึ่งเป็นการทดสอบมาตรฐานอุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าสำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้าระดับแรงดันต่ำ (ไม่เกิน 1,000 โวลต์) Class 0.5S ของอุปกรณ์ 3 เฟส 4 สาย ที่ติดตั้งประกอบหม้อแปลงกระแสไฟฟ้านั้นด้วย

สำหรับในส่วนของพัฒนากระบวนการสื่อสารข้อมูลการเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายตามมาตรฐาน IEC61850 ผ่านเครือข่าย NB-IoT นั้น ได้ออกแบบชุดข้อมูลการเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายที่มีโครงสร้างตามมาตรฐาน IEC61850 ไว้ภายในบอร์ด BeagleBone Black และนำค่า Payload ของข้อมูลเฝ้าสังเกตจาก Magellan ซึ่งเป็น AIS IoT Development Platform ที่ถูกส่งมาจากอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายที่พัฒนาขึ้น ผ่านเครือข่าย NB-IoT มาเติมค่าข้อมูลการเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายลงในชุดข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 ที่ออกแบบและพัฒนาไว้บนบอร์ด BeagleBone Black จึงทำให้ Server มีชุดข้อมูลการเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายตามมาตรฐาน IEC61850 ที่สมบูรณ์ โดยกระบวนการสื่อสารข้อมูลการเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายตามมาตรฐาน IEC61850 ผ่านเครือข่าย NB-IoT ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ ทำให้สามารถสร้างชุดข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 ซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการรับส่งข้อมูลสูง จากข้อมูลการเฝ้าสังเกตของอุปกรณ์ต้นทางผ่านเครือข่าย NB-IoT ที่มี

แถบความกว้างข้อมูลต่ำได้ และทำการทดสอบชุดข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 ที่พัฒนาขึ้นกับซอฟต์แวร์ IED Explorer ทำหน้าที่เป็น Client เรียกอ่านชุดข้อมูลเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายตามมาตรฐาน IEC61850 จาก Server เพื่อตรวจสอบว่าอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายที่พัฒนาขึ้น สามารถทำงานร่วมกันและชุดข้อมูลที่พัฒนาขึ้นเป็นไปตามมาตรฐาน IEC61850

7.2 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 7.2.1) อุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ที่สามารถวัดค่าทางไฟฟ้าด้านทุติยภูมิหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ระบบ 22 kv 3 เฟส 4 สาย 400/230 V ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้อย่างเหมาะสม ซึ่งผ่านการทดสอบการวัดค่าทางไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC62053-22
- 7.2.2) กระบวนการสื่อสารข้อมูลการเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายตามมาตรฐาน IEC61850 ซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการรับส่งข้อมูลสูง ผ่านเครือข่าย NB-IoT ที่มีแถบความกว้างข้อมูลต่ำ

7.3 ข้อเสนอแนะ

การพัฒนาอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายตามมาตรฐาน IEC61850 ผ่านเครือข่าย NB-IoT สามารถบรรลุตามวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้แล้ว ซึ่งทั้งนี้ ผู้วิจัยยังเล็งเห็นแนวทางการปรับปรุงและพัฒนาอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายตามมาตรฐาน IEC61850 ผ่านเครือข่าย NB-IoT เพื่อให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพและใช้ประโยชน์จากอุปกรณ์ที่พัฒนาได้มากยิ่งขึ้นในอนาคต ตามข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

- 7.3.1) Magellan (AIS IoT Development Platform) มีพื้นที่การจัดเก็บข้อมูลให้เพียง 2 วัน หรือ 48 ชั่วโมงล่าสุดเท่านั้น หากต้องการเก็บประวัติข้อมูลการเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายให้ยาวนานยิ่งขึ้น ควรออกแบบส่วนฐานข้อมูล (Database) เพิ่มเติม เพื่อจะได้ข้อมูลการเฝ้าสังเกตอย่างต่อเนื่องและติดตามสถานะการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าได้อย่างยาวนานและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น
- 7.3.2) พัฒนาต่อยอดให้เป็นระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ที่มีความสามารถแจ้งเตือนและแยกแยะลักษณะความผิดปกติในการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายได้

บรรณานุกรม

1. กองแผนงานระบบไฟฟ้าอัจฉริยะ, *PEA Smart Grid Roadmap Revision Aligned with National Policy.*, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.
2. Samo Ceferin, G.J., Zvonko Toroš, Tomaž Kastelic and Borut Prašnikar, *Power transformer monitoring systems for better asset management.* 24th International Conference & Exhibition on Electricity Distribution (CIRED), 2017: p. 395-399.
3. ศิโรช ศรีสดี, *การพัฒนาต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายบนมาตรฐาน ไออีซี 61850*, ปรินูญานิพนธ์ปรินูญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2559, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
4. บริษัท คิวทีซี เอนเนอร์ยี จำกัด (มหาชน), *หม้อแปลงไฟฟ้าอัจฉริยะ*. Available from: https://qtc-energy.com/wp-content/uploads/2019/04/PC04_Smart-Transformer-Monitoring-System-Catalog.pdf.
5. บริษัท เจริญชัยหม้อแปลงไฟฟ้า จำกัด, *Transformer Monitoring Device*. Available from: http://www.charoenchai.com/file/CCTGroupProduct_PortFolio.pdf.
6. Secure Meters Ltd., *Distribution Transformer Meter*. Available from: <https://www.securemeters.com/files/8515/2699/0952/prodigy.pdf>.
7. IEC, *IEC 61850-7-1 Communication networks and systems in substations*, in Part 7-1: *Basic communication structure for substation and feeder equipment – Principles and models*.
8. Keiichi Kaneda, S.T., Nobuhisa Fujiyama, Yoshikazu Arata, and Hachidai Ito, *IEC61850 based Substation Automation System*. 2008 Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference, 2008.
9. Yuke Li, X.C., Yang Cao, Dexin Wang and Liuqing Yang, *Smart Choice for the Smart Grid: Narrowband Internet of Things (NB-IoT)*. IEEE Internet of Things Journal, 2018. 5: p. 1505-1515.
10. STMicroelectronics, *User manual “EVALSTPM34, EVALSTPM33, EVALSTPM32 evaluation board”*. Available from: https://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00113794-

- evalstpm34-evalstpm33-evalstpm32-evaluation-board-stmicroelectronics.pdf.
11. STMicroelectronics, *Application note “The STPM3X and the STCOMET application and calibration”*. Available from: https://www.st.com/resource/en/application_note/dm00112717-the-stpm3x-and-the-stcomet-application-calibration-stmicroelectronics.pdf.
 12. STMicroelectronics, *User manual “Getting started with the STPM3X”*. Available from : https://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00290866-getting-started-with-the-stpm3x--stmicroelectronics.pdf.
 13. STMicroelectronics, *STPM32, STPM33, STPM34 “ASSP for metering applications with up to four independent 24-bit 2nd order sigma-delta ADCs, 4 MHz OSF and 2 embedded PGLNA”*. Available from : <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stpm34.pdf>.
 14. Arduinotronics, *DS18B20 Waterproof Temperature Sensor*. Available from : <https://www.arduinotronics.com/product/478/waterproof-temperature-sensor-ds18b20-3-meter>.
 15. บริษัท แอดวานซ์ อินโฟร์ เซอร์วิส (AIS) จำกัด (มหาชน), *Devio NB-Devkit I*. Available from : <https://aiap.ais.co.th/iotdevcenter/IoTDevice/DevioNBDevkit>.
 16. BeagleBoard, *BeagleBone Black*. Available from:<https://beagleboard.org/black>.
 17. Kais Mekki, E.B., Frederic Chaxel and Fernand Meyer, *A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment*, ICT Express, 2019: p. 1-7.
 18. IEC, *IEC 61850-6 Communication networks and systems for power utility automation, in Part 6: Configuration description language for communication in electrical substations related to IEDs*.
 19. Drew Baigent, M.A.a.R.M. *IEC 61850 Communication Networks and Systems In Substations: An Overview for Users*. Available from: <https://www.gegridolutions.com/multilin/journals/issues/spring09/iec61850.pdf>.
 20. IEC, *IEC 61850-7-2 Communication networks and systems in substations, in Part 7-2: Basic communication structure for substation and feeder equipment – Abstract communication service interface (ACSI)*.

21. WIKIPEDIA, *Substation Configuration Language*. Available from : https://en.wikipedia.org/wiki/Substation_Configuration_Language.
22. กองมิเตอร์, *ระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ว่าด้วยวิธีปฏิบัติเกี่ยวกับมิเตอร์ พ.ศ. 2558.*, 2558, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.
23. บริษัท แอดวานซ์ อินโฟร์ เซอร์วิส (AIS) จำกัด (มหาชน), *Magellan*. Available from : <https://magellan.ais.co.th>.
24. Sourceforge, *Software IED Explorer*. Available from : <https://sourceforge.net/projects/iedexplorer>.
25. *ระเบียบคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน ว่าด้วยมาตรฐาน วิธีการทดสอบและการรับรองผลการตรวจสอบอุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า สำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2559.*, 2559, คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	อนุกุล ต້องสู้
วัน เดือน ปี เกิด	3 กันยายน 2532
สถานที่เกิด	จังหวัดลำปาง ประเทศไทย
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (เกียรตินิยมอันดับ 1) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปีการศึกษา 2555 และเป็นผู้ได้รับทุนการศึกษาโครงการความร่วมมือทางวิชาการระหว่าง กฟภ. กับจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รุ่นที่ 3 หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ด้าน Smart Grid ปีการศึกษา 2561
ที่อยู่ปัจจุบัน	เฟลีนเพลสสามพราน ที่อยู่ 106 หมู่ 3 ซอยทรงคนอง 6-7 ถนนพุทธมณฑลสาย 6 ตำบล ทรงคนอง อำเภอ สามพราน จังหวัด นครปฐม 73210
ผลงานตีพิมพ์	อนุกุล ต້องสู้ และวันเฉลิม โปธา. การส่งข้อมูลการเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายตามมาตรฐาน IEC 61850 ผ่านเครือข่าย NB-IoT งานประชุมวิชาการและนวัตกรรม กฟภ. ปี 2562 (PEACON&INNOVATION 2019)
รางวัลที่ได้รับ	-