การพัฒนาระบบการอ่านมิเตอร์โดยอัตโนมัติตามมาตรฐาน ZigBee Smart Energy Profile

นายแชมป์ ประภาสวัสดิ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

DEVELOPEMENT OF AN AUTOMATIC METER READING SYSTEM BASED ON ZIGBEE SMART ENERGY PROFILE

Mr. Champ Prapasawad

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาระบบการอ่านมิเตอร์โดยอัตโนมัติตามมาตรฐาน ZigBee Smart Energy Profile
โดย	นายแชมป์ ประภาสวัสดิ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันเฉลิม โปรา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. เอกชัย ลีลารัศมี)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันเฉลิม โปรา)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร. วิษุวัฒน์ ปลอดประดิษฐ์)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2556

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Department:	Electrical Engineering	Student's Signature	.....
Field of Study:	Electrical Engineering	Advisor's Signature	.....
Academic Year:	2013		

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันเฉลิม โปรา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆ และกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์และงานวิจัยด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณ อาจารย์ เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ในห้องปฏิบัติการวิจัยการออกแบบและประยุกต์วงจรรวมทุกคนสำหรับความช่วยเหลือ คำแนะนำ และขอบคุณสำหรับมิตรภาพและความรู้สึกดี ๆ ที่มีให้กันมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา อันเป็นที่เคารพรัก ที่คอยดูแลเอาใจใส่ และให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าด้วยดีเสมอมาจนกระทั่งมีวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ได้รับการสนับสนุนทุนการศึกษาจาก ทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวทรงเจริญพระชนมายุครบ 72 พรรษา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1. แนวเหตุผลในการทำวิทยานิพนธ์ 1

.1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2

1.3. ขอบเขตของการวิจัย 2

1.4. วิธีการดำเนินงานวิจัย 2

1.5. ประโยชน์คาดว่าจะได้รับ 3

1.6. ลำดับขั้นตอนในงานวิจัย 3

บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้อง 5

2.1. มิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า 5

2.1.1. หลักการวัดกระแส 5

2.1.2. หลักการวัดแรงดัน 6

2.1.3. หลักการหาของกำลังงาน [2] 6

2.2. ระบบอ่านค่ามิเตอร์แบบอัตโนมัติ 7

2.2.1. โมดูลที่ใช้สื่อสาร 7

2.2.2. ประเภทการทำงานของอุปกรณ์ 7

2.2.3. รูปแบบเครือข่าย [3] 8

2.2.4. โครงสร้างของชุดโพรโทคอล ZigBee [3, 5] 9

2.2.4.1. ชั้นประยุกต์ (Application Layer: APL) 10

2.2.4.1.1. โครงสร้างงานประยุกต์ (Application framework) 11

2.2.4.1.2. ชั้นสนับสนุนย่อย 11

2.2.4.1.3. ZigBee Device Object (ZDO) 12

2.2.4.2. ชั้นเครือข่าย (Network layer: NWK) 12

หน้า

2.2.4.3. ชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อกลาง (MAC layer) และชั้นกายภาพ (PHY layer) ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 13
2.2.5. ZigBee Smart Energy Profile [6, 7] 13
2.2.5.1. ZigBee Cluster Library (ZCL) 14
2.2.5.1.1. ส่วนที่เป็น General ประกอบด้วย 15
2.2.5.1.2. ส่วนที่เป็น Smart Energy ประกอบด้วย 16
2.2.5.2. กลุ่มเก็บข้อมูล (Clusters) [5-7] 17
2.2.5.3. ประเภทข้อมูล (Attributes) [5-7] 17
2.2.5.4. ZigBee Smart Energy Devices [5] 17
2.2.6. ZigBee Smart Energy Security [6, 7] 19
2.2.6.1. ZigBee PRO Security [6, 7] 20
2.2.6.2. Smart Energy Security [6, 7] 20
2.2.6.2.1. Pre-configured Link Key [5-7] 21
2.2.6.2.2. Security Certificate [5-7] 22
2.2.7. Zigbee Smart Energy Network [5-7] 22
บทที่ 3 การออกแบบฮาร์ดแวร์ 26
3.1. รายละเอียดโครงสร้างของมิเตอร์ไฟฟ้า 27
3.1.1. หน่วยประมวลผลกลาง STM32L152RVB6 [9] 28
3.1.2. ตัวคำนวณพลังงาน STPMC1 [2] 29
3.1.3. ตัวแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิตอล (Analog to digital converter; ADC) STPMS1 [10] 30
3.1.4. โมดูล ZigBee 32
3.1.5. แฟลชข้อมูล (Data Flash) 32
3.1.6. ส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ 33
3.1.6.1. จอผลึกเหลว (LCD) 33
3.1.6.2. หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า (Current Transformer) 34
3.1.6.3. วาริสเตอร์ 34
3.1.6.4. Electric Double Layer Capacitors 34
3.1.6.5. แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า 35

CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

3.2. รายละเอียดโครงสร้างของตัวประสานกลาง 35
3.2.1. ตัวประมวลผลโพรโตคอล ZigBee STM32W108xx 36
3.2.2. บล็อก ANTENNA 37
3.2.3. FT232RL 37
3.3. ฮาร์ดแวร์ที่เปลี่ยนใหม่ 37
3.3.1. STPMS2 [12] 37
3.4. ฮาร์ดแวร์ที่พัฒนาขึ้น 39
.3.4.1 ฮาร์ดแวร์ที่พัฒนาขึ้นแบบใหม่ มี 2 เลเยอร์ดังนี้ 39
3.4.2. ฮาร์ดแวร์ที่พัฒนาขึ้นแบบเก่า 40
บทที่ 4 รายละเอียดเฟิร์มแวร์ 42
4.1. เฟิร์มแวร์ควบคุม SEM 42
4.1.1. โปรแกรมเริ่มต้นการทำงาน 43
4.1.2. โปรแกรมการจัดการไอซี STPMC1 44
.4.1.3 โปรแกรมตรวจสอบข้อมูลภายในรีจิสเตอร์เกินและโปรแกรมอัพเดทปริมาณพลังงาน 45
.4.1.4 โปรแกรมควบคุมความต้องการทางพลังงาน 46
4.1.4.1. กระบวนการการบันทึกข้อมูลลงแฟลชข้อมูล (Data Flash) 47
4.1.5. โปรแกรมแสดงข้อมูลผ่านจอแอลซีดี 48
4.1.6. โปรแกรมชุดคำสั่งสื่อสารในชั้นประยุกต์ 49
4.1.6.1. รูปแบบของกลุ่มข้อมูลที่ใช้สื่อสารในชั้นประยุกต์ 50
4.1.6.1.1. คำสั่งทั่วไป (General Command) [4] 50
4.1.6.1.2. คำสั่งเฉพาะเจาะจง (Specific Command) [4, 5] 51
4.1.7. โปรแกรมควบคุมการทำงานของโพรโตคอล ZigBee 54
.4.1.7.1 โปรแกรมควบคุมการรับส่งข้อมูลภายในโปรโตคอล ZigBee 56
4.2. โปรแกรมควบคุม ESP 56
4.2.1. โครงสร้างการทำงานของโปรแกรมควบคุม ESP 56
4.2.2. โปรแกรมควบคุมการทำงานสำหรับโพรโตคอล ZigBee 57
4.3. โปรแกรมควบคุม Data Center (DC) 60

หน้า

4.3.1. การทำงานของโปรแกรมส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้ 60
4.3.1.1. หน้าต่างรายการเลือกหลัก 61
4.3.1.2. หน้าต่างสมัครสมาชิก 61
.4.3.1.3 หน้าต่างล็อกอินระบบ 62
4.3.1.4. หน้าต่างแก้ไขข้อมูล 63
4.3.1.5. หน้าต่างลบข้อมูล 63
4.3.1.6. หน้าต่างเลือกใช้ประโยชน์ทางเซิร์ฟเวอร์ 63
4.3.1.7. หน้าต่างการเชื่อมต่อ 64
4.3.1.8. หน้าต่างแสดงข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้า 65
.4.3.1.9 หน้าต่างแสดงลักษณะมิเตอร์ของผู้ใช้ 66
4.4. ระบบฐานข้อมูล (Database System) [14] 66
4.4.1. ระบบจัดการฐานข้อมูล (Database Management System : DBMS) 67
4.4.2. พื้นฐานการสร้างแบบจำลองข้อมูล (Data Model Basic Building Block) 68
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง 70
5.1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 70
5.1.1. แหล่งจ่ายพลังงาน CALSOURCE 200 70
5.1.2. มิเตอร์อ้างอิง PRS 1.3 70
5.2. การทดสอบความแม่น 72
5.2.1. ผลการทดลอง 73
5.2.2. การคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้า 79
5.2.2.1. การหาค่า I_{rms} [1] 79
5.2.2.2. การหาค่า U_{rms} [1] 80
5.3. ทดลองรับส่งข้อมูลจากมิเตอร์ 82
5.3.1. คำสั่ง Get Profile 83
5.3.2. คำสั่ง Price 84
5.3.3. คำสั่งทั่วไป 85
5.4. แสดงข้อมูลบนกราฟฟิกผู้ใช้ (Graphic User Interface: GUI) 85

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.4.1. แสดงข้อมูลการใช้พลังงานของผู้ใช้ 85
5.4.2. แสดงคุณลักษณะของ SEM 86
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 89
6.1. สรุปผลการทดลอง 89
6.2. ข้อเสนอแนะ 90
รายการอ้างอิง 91
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 94

สารบัญภาพ

รูปที่ 2—1 เส้นทางของสัญญาณกระแส 5
รูปที่ 2—2 เส้นทางของสัญญาณแรงดัน 6
รูปที่ 2—3 เครือข่ายแบบดาว 8
รูปที่ 2—4 เครือข่ายแบบกลุ่มโครงสร้างต้นไม้ 9
รูปที่ 2—5 เครือข่ายแบบตาข่าย 9
รูปที่ 2—6 ZigBee Protocol stack 10
รูปที่ 2—7 โครงสร้างของชั้นสนับสนุนย่อย 11
รูปที่ 2—8 โครงสร้างของชั้นเครือข่าย 12
รูปที่ 2—9 โครงสร้างของ ZigBee PRO Stack 14
รูปที่ 2—10 การคุยกันระหว่าง ผู้ใช้ และ เซิพเวอร์ คลัสเตอร์ 17
รูปที่ 2—11 Application Link Key Establishment 21
รูปที่ 2—12 Simplest Utility Private HANs 23
รูปที่ 2—13 Utility Private HANs with Range of SE Devices 24
รูปที่ 2—14 Utility Private NANs 25
รูปที่ 3—1 แสดงการเชื่อมต่อมิเตอร์กับบ้าน 26
รูปที่ 3—2 แสดงการสื่อสารของระบบอ่านมิเตอร์แบบอัตโนมัติ 27
รูปที่ 3—3 แสดงโครงสร้างภายใน SEM 28
รูปที่ 3—4 STM32L152VBT6 28
รูปที่ 3—5 STPMC1 29
รูปที่ 3—6 STPMS1 30

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 3—7 วงจรประยุกต์ใช้ร่วมกับ STPMS1 31
รูปที่ 3—8 Module ZigBee 32
รูปที่ 3—9 แสดงการติดต่อสื่อสารระหว่าง MCU กับ Data Flash ด้วยโมดูล SPI 33
รู(ที่ 3—10 จอแอลซีดี และรายละเอียดต่างๆภายในจอ **Error! Bookmark not defined.**
รูปที่ 3—11 หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า 34
รูปที่ 3—12 วารีสเตอร์ 34
รูปที่ 3—13 คาปาซิเตอร์ 34
รูปที่ 3—14 แหล่งแปลงไฟเพื่อจ่ายไฟเลี้ยงมิเตอร์ 35
รูปที่ 3—15 โครงสร้างในส่วนของตัวประสานกลาง 36
รูปที่ 3—16 ชั้นประยุกต์ใช้งานและโปรโตคอลของโครงสื่อสารวิทยุทั่วไปตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 36
รูปที่ 3—17 STPMS2 37
รูปที่ 3—18 ลายวงจรของ STPMS2 ที่ต่อร่วมกับ STPMC1 37
รูปที่ 3—19 บอร์ดมิเตอร์แบบใหม่ชั้นบน 39
รูปที่ 3—20 บอร์ดมิเตอร์แบบใหม่ชั้นล่าง 40
รูปที่ 3—21 บอร์ดมิเตอร์แบบเก่า 40
รูปที่ 3—22 บอร์ด STPMS1 แบบเก่า 41
รูปที่ 3—23 บอร์ด ZigBee สำเร็จรูป 41
รูปที่ 4—1 โครงสร้างเฟิร์มแวร์บน SEM 42
รูปที่ 4—2 ซ้ายการทำงานทั้งหมดของระบบ SEM ขวาการทำงานกำหนดค่ารีจิสเตอร์เริ่มต้นให้กับช่องสื่อสาร 43
รูปที่ 4—3 ระบบการทำงานเมื่อเกิดการขัดจังหวะ 44
รูปที่ 4—4 ระบบการทำงานของไอซี STPMSC1 ทั้ง 15 โหมด 45
รูปที่ 4—5 ซ้ายโปรแกรมตรวจสอบข้อมูลเกินภายในรีจิสเตอร์ ขวาโปรแกรมอัฟเดทข้อมูล 46
รูปที่ 4—6 โปรแกรมควบคุมความต้องการปริมาณทางไฟฟ้า 47
รูปที่ 4—7 โปรแกรมควบคุมกระบวนการเก็บข้อมูลลงแฟลช 48
รูปที่ 4—8 โปรแกรมตรวจสอบปุ่มกด 49
รูปที่ 4—9 โปรแกรมแสดงข้อมูลผ่านจอแอลซีดี 49
รูปที่ 4—10 เฟรมข้อมูลสำหรับคำสั่งเขียน 50
รูปที่ 4—11 เฟรมข้อมูลสำหรับคำสั่งอ่าน 51

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4—12 เฟรมข้อมูลสำหรับเรียกดูโปรไฟต์ 52
รูปที่ 4—13 เฟรมข้อมูลสำหรับตอบสนองคำสั่งโปรไฟต์ 52
รูปที่ 4—14 แผนผัง ASM ควมคุมการทำงานของโพรโตคอล ZigBee 55
รูปที่ 4—15 โปรแกรมตรวจสอบรหัสมิเตอร์ 56
รูปที่ 4—16 โครงสร้างโปรแกรมควบคุมผั่งตัวประสาน 57
รูปที่ 4—17 โครงสร้างโปรแกรมควบคุมตัว ESP 58
รูปที่ 4—18 แผนผัง การทำงานทั้งหมดของระบบอ่านมิเตอร์แบบอัตโนมัติประกอบด้วย SEM 2 ตัว ESP 1 ตัว และ DC 1 ตัว 59
รูปที่ 4—19 โครงสร้างโปรแกรมควบคุมบนคอมพิวเตอร์ 60
รูปที่ 4—20 หน้าต่างรายการเลือกหลัก 61
รูปที่ 4—21 หน้าต่างสมัครสมาชิก 62
รูปที่ 4—22 หน้าต่างล็อกอินระบบ 62
รูปที่ 4—23 หน้าต่างแก้ไขข้อมูล 63
รูปที่ 4—24 หน้าต่างลบข้อมูล 63
รูปที่ 4—25 หน้าต่างเลือกใช้โหมดต่างๆ 64
รูปที่ 4—26 หน้าต่างการเชื่อมต่อ 65
รูปที่ 4—27 หน้าต่างแสดงข้อมูลการใช้ไฟฟ้า 65
รูปที่ 4—28 หน้าต่างแสดงแสดงลักษณะมิเตอร์ของผู้ใช้ 66
รูปที่ 4—29 แสดงการเก็บข้อมูลที่ได้จากมิเตอร์ไปยัง Database โดยผ่าน DBMS 67
รูปที่ 4—30 บนการโต้ตอบ DBMS โดยตรง ล่างการโต้ตอบกับ DBMS ด้วยการผ่านโปรแกรมที่เขียนขึ้น 67
รูปที่ 5—1 CALSOURCE 200 70
รูปที่ 5—2 มิเตอร์อ้างอิง 71
รูปที่ 5—3 ไดอะแกรมการต่อวัดระบบ 3 เฟส 4 สาย ที่พิกัด 100 แอมป์ 71
รูปที่ 5—4 แคลชีตไว้ตรวจสอบค่ากระแสและแรงดันที่อ่านได้อยู่ในขอบเขตที่ใช้งานหรือไหม 73
รูปที่ 5—5 กราฟค่าความผิดพลาดสูงสุดของพลังงานแอคทีฟช่วงกระแส $0.5 \leq I < 1$ ที่ PF = 1 74
รูปที่ 5—6 กราฟค่าความผิดพลาดสูงสุดของพลังงานแอคทีฟช่วงกระแส $1 \leq I \leq 9$ ที่ PF = 1 74

รูปที่ 5—7 กราฟค่าความผิดพลาดสูงสุดของพลังงานแอคทีฟช่วงกระแส $10 \leq I \leq 100$ ที่ PF = 1 75

รูปที่ 5—8 กราฟค่าความผิดพลาดสูงสุดของพลังงานแอคทีฟช่วงกระแส $1 \leq I < 2$ ที่ PF = 0.5 Inductive 75

รูปที่ 5—9 กราฟค่าความผิดพลาดสูงสุดของพลังงานแอคทีฟช่วงกระแส $1 \leq I < 2$ ที่ PF = 0.8 Capacitive 76

รูปที่ 5—10 กราฟค่าความผิดพลาดสูงสุดของพลังงานแอคทีฟช่วงกระแส $2 \leq I < 10$ ที่ PF = 0.5 Inductive 76

รูปที่ 5—11 กราฟค่าความผิดพลาดสูงสุดของพลังงานแอคทีฟช่วงกระแส $2 \leq I \leq 100$ ที่ PF = 0.5 Inductive 77

รูปที่ 5—12 กราฟค่าความผิดพลาดสูงสุดของพลังงานแอคทีฟช่วงกระแส $2 \leq I < 10$ ที่ PF = 0.8 Capacitive 77

รูปที่ 5—13 กราฟค่าความผิดพลาดสูงสุดของพลังงานแอคทีฟช่วงกระแส $10 \leq I \leq 100$ ที่ PF = 0.8 Capacitive 78

รูปที่ 5—14 วัดค่ากระแสสิบแอมแปร์ แรงดัน 220 โวลต์ 81

รูปที่ 5—15 รูปแบบโครงสร้างเครือข่ายแบบสตาร์ 82

รูปที่ 5—16 รูปแบบโครงสร้างเครือข่ายแบบต้นไม้ 83

รูปที่ 5—17 แสดงข้อมูลการใช้ไฟ ซึ่งบันทึกข้อมูลทุกๆ 2 นาที 86

รูปที่ 5—18 แสดงข้อมูลการใช้ไฟ ซึ่งบันทึกข้อมูลทุกๆ 15 นาที 86

รูปที่ 5—19 แสดงสถานะของ SEM1 87

รูปที่ 5—20 แสดงสถานะของ SEM2 87

สารบัญตาราง

ตาราง 2—1 SE Profile Clusters 15

ตาราง 2—2 คลัสเตอร์ทั้งหมดของอุปกรณ์ SE ที่ใช้ร่วมกัน 18

ตาราง 2—3 คลัสเตอร์ที่ถูกรองรับโดย Coordinator 18

ตาราง 2—4 คลัสเตอร์ที่ถูกรองรับโดยอุปกรณ์การวัด 19

ตาราง 5—1 ตารางแสดงการกำหนดค่า Configuration bit บนไอซี STPMC1 ที่สำคัญ .. 72

ตาราง 5—2 เปอร์เซนต์ของค่าความผิดพลาดทางพลังงาน 73

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง 5—3 ค่าความผิดพลาดที่วัดได้สูงสุดแต่ละเฟสตามมาตรฐาน IEC 78
ตาราง 5—4 กระบวนการตรวจรหัสมิเตอร์เพื่อทำการโหลดข้อมูล 83
ตาราง 5—5 กระบวนการร้องขอข้อมูลด้วยคำสั่ง Get Profile 84
ตาราง 5—6 เก็บราคาใน Buffer 84
ตาราง 5—7 ร้องขอราคาจาก Server 84
ตาราง 5—8 คำสั่งเรียกดูสถานะของ SEM 85

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

1.1. แนวเหตุผลในการทำวิทยานิพนธ์

การอ่านค่าไฟฟ้าตามบ้าน นอกจากอาศัยเจ้าหน้าที่จดบันทึกค่าที่อ่านได้จากตัวมิเตอร์โดยตรงแล้ว เพื่อความสะดวกในปัจจุบันได้มีระบบอ่านมิเตอร์โดยอัตโนมัติ (Automatic Meter Reading : AMR) ช่วยอ่านค่าที่ถูกบันทึกในมิเตอร์โดยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ นอกเหนือจากความสะดวกแล้ว ระบบ AMR ยังลดผลของการอ่านหรือบันทึกผิดพลาดลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการทำใบแจ้งหนี้อีกด้วย ซึ่งการสื่อสารมีทั้งแบบใช้สาย และแบบไร้สาย ตัวกลางในการสื่อสารอาจใช้ คลื่นความถี่วิทยุ แสงอินฟราเรด โมเด็มผ่านเครือข่ายโทรศัพท์บ้าน(PSTN) โมเด็มผ่านเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ (GSM/GPRS) สัญญาณดาวเทียม หรือผ่านสายส่งกำลังก็ได้ ควรเลือกชนิดการสื่อสารให้เหมาะกับสถานที่ติดตั้ง ซึ่งต้องพิจารณาปัจจัยหลายอย่าง เช่นชนิดอาคาร โครงสร้างทางกายภาพ สัญญาณรบกวนในที่ที่จะติดตั้ง เป็นต้น

ต่อมาได้มีการพัฒนา AMR ให้เป็นระบบ Advanced Metering Infrastructure (AMI) เพื่อรองรับการสื่อสารสองทางให้ดียิ่งขึ้น นอกจากจะใช้ประโยชน์ด้านการจัดเก็บค่าไฟฟ้าแล้ว AMI ช่วยให้ผู้ใช้ไฟฟ้ามีทางเลือกที่จะลดหรือเพิ่มการใช้ไฟฟ้า ในขณะที่ศูนย์ข้อมูลแจ้งไว้ล่วงหน้าว่าค่าไฟฟ้าจะเพิ่มหรือลดได้ ค่าไฟฟ้าที่สูงสะท้อนถึงความต้องการไฟฟ้าโดยรวมที่สูง หากผู้ใช้ตอบสนองด้วยการลดการใช้ไฟฟ้า ก็จะทำให้ยอดกำลังไฟฟ้าลดลง ซึ่งจะเป็นผลดีกับเสถียรภาพของระบบ และยังช่วยชะลอการสร้างโรงไฟฟ้าใหม่ได้ไปอีกระยะหนึ่ง

ZigBee ถูกออกแบบขึ้นสำหรับระบบเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล (WPAN) ภายใต้มาตรฐาน IEEE โดยมาตรฐานนี้เหมาะสำหรับการสื่อสารความเร็วต่ำใช้กำลังไฟฟ้าน้อย อุปกรณ์ราคา 802.15.4 ถูก และมีคุณสมบัติการจัดการตัวเองได้ เป็นเทคโนโลยีไร้สายที่ร่วมกันสื่อสารข้อมูลผ่านเซ็นเซอร์ขนาดจิ๋ว ซึ่งระบบนี้ จะสามารถทำงานในร่ม กลางแจ้ง ทนแดดทนฝน และอยู่ได้ด้วยแบตเตอรี่ก้อนเล็ก เช่นถ่าน AA 2 ก้อน นานเป็นเดือน เป็นปี มีจำนวนเป็นพันๆ หมื่นๆ ชิ้นที่ฝังอยู่ตามส่วนต่างๆ ในอาคาร สำนักงาน โรงงาน หรือแม้แต่ในบ้าน

ประเทศญี่ปุ่นมีการใช้งานมิเตอร์อิเล็กทรอนิกส์มาเป็นเวลานับสิบปีแล้ว ในประเทศไทยเองยังถือว่าเป็นสิ่งใหม่ ที่สามารถเติบโตพร้อมกับธุรกิจ อพาร์ทเม้นท์ ห้องเช่า ที่กำลังขยายตัว ณ ขณะนี้ มิเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ ถูกออกแบบเพื่อขจัดปัญหาที่เกิดขึ้นกับจานหมุน แม้นว่ามิเตอร์ที่ใช้กันอยู่จะมียี่ห้อที่หลากหลายแตกต่างในการเชื่อมข้อมูลถึงกระนั้นยังคงอิงมาตรฐาน (IEC) เป็นมาตรฐานเดียวกัน ในอนาคตแนวโน้มที่ธุรกิจการเช่าอาคาร เพื่อการอยู่อาศัยจะเปลี่ยนมาใช้แบบดิจิตอล เนื่องจากสามารถพัฒนาเพื่อตระหนักถึงค่าพลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลาต่างๆ เพื่อออกแบบและวางแผนในการ

บริหารพลังงาน ในแง่มุมทางสิ่งแวดล้อมก็เป็นอีกหนทางหนึ่งในการลดปัญหาโลกร้อนซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญของโลกในขณะนี้

1.2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- พัฒนามิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าแบบสามเฟส
- พัฒนาเครือข่ายการสื่อสาร ตามมาตรฐาน Smart Energy Profile & ZigBee Pro/IEEE 802.15.4 สำหรับการสื่อสารระหว่างมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้ากับคอมพิวเตอร์ โดยผ่านคลื่นวิทยุย่านความถี่ 2.4 GHz
- พัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับสั่งมิเตอร์เพื่อจัดเก็บค่าที่อ่านได้ แล้วนำไปคำนวณค่าไฟฟ้าและแสดงรูปแบบการใช้ไฟฟ้า

1.3. ขอบเขตของการวิจัย

ระบบการอ่านมิเตอร์โดยอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- พัฒนามิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าแบบสามเฟสสามารถวัดพลังงานสามเฟส มีพิกัด 100 แอมแปร์ วัดค่าพลังงานไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า 3 เฟส 3 สาย ความแม่นยำสูงสุดที่กระแส 10 แอมแปร์ และแรงดัน 220 โวลต์ และมีความแม่นยำไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์
- โดยมิเตอร์แต่ละตัวสร้างโดยใช้ไอซีไอซีที่รองรับมาตราฐาน IEC 62052-11/ 62053-21/62053-23
- ออกแบบระบบการอ่านมิเตอร์โดยอัตโนมัติผ่านทางคลื่นวิทยุตามมาตรฐาน ZigBee ที่สามารถสื่อสารได้สองทาง คือ ส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์ และร้องขอข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ได้
- สร้างเครือข่ายต้นแบบ ZigBee ที่ประกอบด้วย เครื่องคอมพิวเตอร์เป็น Data Center (DC), ESP (Energy Service Portal) 1 ตัว, และ SEM (Smart Energy Meter) 2 ตัว
- ระยะการส่งข้อมูลสูงสุดระหว่าง SEM กับ SEM 50 เมตร
- ระยะการส่งข้อมูลสูงสุดระหว่าง SEM กับ ESP 50 เมตร
- มีเฟิร์มแวร์โปรแกรม GUI บนเครื่องคอมพิวเตอร์ไว้เชื่อมต่อระหว่าง ตัวประสาน กับฐานข้อมูล โดยแสดงค่าพลังงานไฟฟ้า และค่าไฟฟ้าของมิเตอร์แต่ละตัวในระบบ

1.4. วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยพัฒนาระบบการอ่านมิเตอร์โดยอัตโนมัติมีรายละเอียดดังนี้

- ศึกษาแพ็คเกจไอซีไอซีสำเร็จรูป STPMC1 กับ STPMS1/S2
- ศึกษาโพรโตคอล ZigBee

- ศึกษา Specific ZigBee SE Profile
- ศึกษามาตรฐานการสร้างมิเตอร์วัดอัตโนมัติ
- ออกแบบและสร้างมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าแบบสามเฟส และระบบการอ่านค่ามิเตอร์โดยอัตโนมัติ
- เขียนโปรแกรมระบบอ่านค่ามิเตอร์โดยอัตโนมัติ โปรแกรมแสดงผล เก็บข้อมูล และโปรแกรมอื่นๆ ลงบนไอซีประมวลผล และจำลองสร้างโปรแกรมประสานกราฟิกกับผู้ใช้ (GUI) และโปรแกรมเก็บข้อมูลลงในฐานข้อมูล
- ทดสอบการทำงานของระบบ
- รวบรวมผลการทดลอง แล้วสรุปผล

1.5. ประโยชน์คาดว่าจะได้รับ

- ได้รับความรู้ในการออกแบบสร้างมิเตอร์วัดพลังงาน 3 เฟส
- ได้รับความรู้การสื่อสารผ่านคลื่นวิทยุตามมาตรฐาน ZigBee/IEEE 802.15.4
- ได้รับความรู้ของ ZigBee Smart Energy Profile
- ได้รับการเรียนรู้เพิ่มพูนทักษะการเขียนภาษาซี เกี่ยวการอ่านมิเตอร์แบบอัตโนมัติ
- สามารถออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ของมิเตอร์ 3 เฟสได้
- ได้รับความรู้ในการออกแบบฐานข้อมูลสำหรับเก็บค่าพลังงานไฟฟ้า
- ได้รับความรู้จากการเขียนโปรแกรมติดต่อกับฐานข้อมูล
- ได้ต้นแบบระบบการอ่านมิเตอร์แบบ AMI แบบใช้คลื่นวิทยุ ZigBee

1.6. ลำดับขั้นตอนในงานวิจัย

วิทยานิพนธ์เล่มนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น ดังนี้ บท 6

- บทที่ 1 เกริ่นนำความเป็นที่จำเป็นที่ต้องสร้างระบบมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ
- บทที่ 2 จะกล่าวถึงหลักการทำงานของไอซี STPMC1 และSTPMS2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับ ZigBee ที่ทำหน้าที่ส่งข้อมูลผ่านคลื่นความถี่วิทยุความถี่ 2.4 GHz ตามมาตรฐาน Smart Energy Profile ZigBee/IEEE 802.15.4
- บทที่ 3 แสดงข้อมูลเกี่ยวกับองค์ประกอบด้านฮาร์ดแวร์ของระบบมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า

- บทที่ 4 แสดงข้อมูลเกี่ยวกับองค์ประกอบด้านเฟิร์มแวร์ของระบบมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า
- บทที่ 5 แสดงข้อมูลการทดลองและการทดสอบใช้งานระบบมิเตอร์วัดพลังงานอัตโนมัติที่ได้พัฒนาขึ้น
- บทที่ 6 แสดงข้อสรุปและข้อเสนอแนะของงานวิจัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

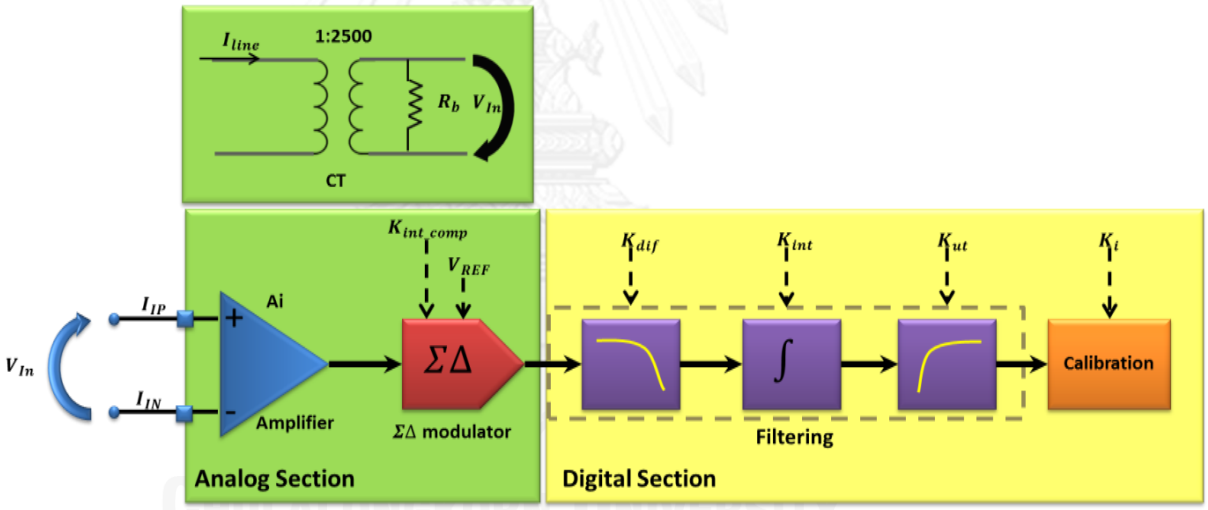
บทที่ 2

ความรู้พื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1. มิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า

2.1.1. หลักการวัดกระแส

กรณีใช้หม้อแปลงกระแส (Current Transformer , CT) ผ่านกระแสมีความต้านทานเบอร์เด้น (Rb) ต่อคร่อมอยู่ จะได้สัญญาณเป็นแรงดันโดยนำสัญญาณแรงดันผ่านอัตราขยาย (GAIN; Ai) ซึ่งสัญญาณแรงดันที่เข้ามานั้นเป็นสัญญาณแอนาล็อกจะถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิตอล (Analog-to-Digital Converter, ADC, A/D) ซึ่งเป็นแบบซิกมาเดลต้ามอดูเลเตอร์ (sigma-delta modulator) จากนั้นสัญญาณดิจิตอลที่ได้ผ่านวงจรกรองดิจิตอลด้วยการคูณค่าคงที่ต่างๆดังนี้ Kdif, Kint, Kut และ Ki ดังรูปที่ 2—1 [1]



รูปที่ 2—1 เส้นทางของสัญญาณกระแส

กำหนดให้สัญญาณกระแส i(t) และแรงดัน u(t) ดังนี้

$$u(t) = U_{max}.\sin(2\pi ft) \quad (2\text{-}1)$$

$$i(t) = I_{max}.\sin(2\pi ft + \varphi) \quad (2\text{-}2)$$

เมื่อ V_s คือค่าสัญญาณที่ผ่าน A/D และผ่านการปรับวัดค่า [2]

$$V_s = C.\sin(2\pi ft + \varphi) \quad (2\text{-}3)$$

โดย C มีค่าเท่ากับ

$$C = I_{max}.R_b.(A_i/V_{ref}).K_i \quad (2\text{-}4)$$

ฉะนั้น V_{si} ได้จากการอินทเกรท V_s

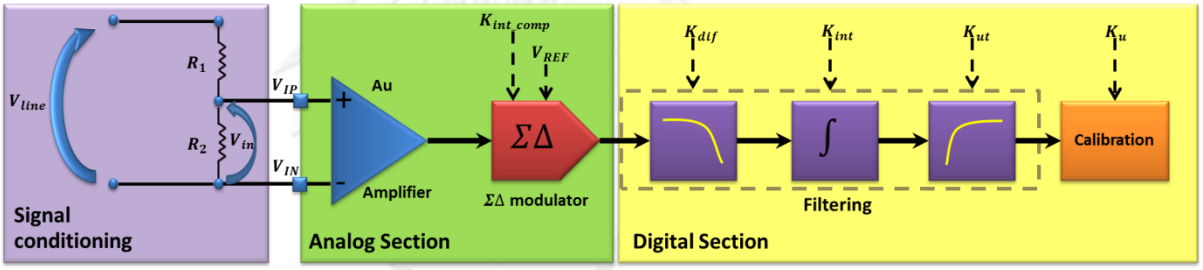
$$V_{si} = -\left(\frac{C}{2\pi f}\right).\cos(2\pi ft + \varphi)\,.K_{int} \quad (2\text{-}5)$$

จะได้ว่า

$$i_{rms}K_sK_{int} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T V_{si}^2\,dt} \quad (2\text{-}6)$$

2.1.2. หลักการวัดแรงดัน

สัญญาณแรงดันที่ผ่านวงจรแบ่งแรงดันแล้วผ่านอัตราขยาย (GAIN; A_U โดยสัญญาณแรงดันที่เป็นสัญญาณแอนาล็อกผ่าน ADC แบบซิกมาเดลต้ามอดูเลเตอร์จะได้สัญญาณดิจิตอลแล้วผ่านวงจรกรองดิจิตอลด้วยการคูณค่าคงที่ต่างๆ ดังนี้ K_{dif} ,K_{int} และ K_{ut} เพื่อลดความผิดพลาดของสัญญาณดิจิตอล-เนื่องจากค่าแรงดันที่อ่านออกมานั้นอาจมีความผิดพลาดอยู่บางฉะนั้นจึงมีส่วนที่ทำการปรับค่าการวัด (Calibration) แสดงดังรูปที่ 2—2 [1]



รูปที่ 2—2 เส้นทางของสัญญาณแรงดัน

เมื่อ V_d คือค่าสัญญาณของแรงดันที่ผ่าน ADC และผ่านการปรับวัดค่า [2]

$$V_d = A.2\pi f.cos(2\pi ft).K_{dif} \quad (2\text{-}7)$$

โดย A มีค่าเท่ากับ

$$A = U_{max}.\left(\frac{R2}{(R1+R2)}\right).\left(\frac{A_U}{V_{ref}}\right).K_U \quad (2\text{-}8)$$

ฉะนั้น V_{di} ได้จากการอินทเกรท V_d

$$V_{di} = A.\sin(2\pi ft)\,.K_{dif}.K_{int} \quad (2\text{-}9)$$

จะได้

$$u_{rms}k_D = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T V_{di}^2\,dt} \quad (2\text{-}10)$$

เมื่อ

$$k_D = \frac{A}{U_{max}} = \left(\frac{R2}{(R1+R2)}\right).\left(\frac{A_U}{V_{ref}}\right).K_U \quad (2\text{-}11)$$

2.1.3. หลักการหาของกำลังงาน [2]

$$P_1 = V_d.V_{si} \quad (2\text{-}12)$$

$$P_2 = V_{di}.V_s \quad (2\text{-}13)$$

เพราะฉะนั้นจะได้กำลังงาน

$$P = (\frac{P_2 - P_1}{2}) \quad (2\text{-}14)$$

2.2. ระบบอ่านค่ามิเตอร์แบบอัตโนมัติ

ในระบบ AMR ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน ได้แก่

- มิเตอร์ (Meter) ทำหน้าที่วัดพลังงานไฟฟ้า และนำค่าพลังงานไฟฟ้าเก็บไว้ในหน่วยความจำ เพื่อรอส่งข้อมูลออกไปตามช่องทางการสื่อสารต่อไป
- เครือข่ายการสื่อสาร (Communication Network) เป็นช่องทางรับส่งข้อมูลระหว่างมิเตอร์กับศูนย์กลางข้อมูล (Data Centre) มีด้วยกันหลายวิธี เช่น เครือข่ายโทรศัพท์, สายส่งกำลัง, โครงข่ายระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่, แสงอินฟราเรด, คลื่นความถี่วิทยุ และอินเทอร์เน็ต เป็นต้น
- ศูนย์กลาง (Center) ทำหน้าที่ติดต่อกับมิเตอร์เพื่อรับส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายสื่อสาร และจัดการข้อมูล เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป เช่น คิดค่าไฟฟ้า เป็นต้น

2.2.1. โมดูลที่ใช้สื่อสาร

โมดูล ZigBee สามารถสร้างเป็นเครือข่ายสื่อสารซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 [3, 4] ได้แบ่งชนิดอุปกรณ์ในเครือข่ายสื่อสารออกเป็น 2 ประเภทดังนี้

- Full Function Device (FFD)) หมายถึงอุปกรณ์ที่สามารถทำงานได้ทุกอย่างในเครือข่าย เช่น เป็นเร้าเตอร์ที่เป็นสื่อกลางในการรับส่งข้อมูลจากอุปกรณ์อื่นๆ ใช้พลังงานจาก power line ทำงานได้ในทุก Topology และสามารถทำเป็นจุดเชื่อมต่อกันได้
- Reduced Function Device (RFD) หมายถึงอุปกรณ์ที่ถูกลดความสามารถการทำงานในเครือข่ายเหมาะแก่การเชื่อมต่อภายในเครือข่าย ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ ไม่สามารถถ่ายทอดข้อมูลจากอุปกรณ์อื่นๆได้ทำได้ง่ายในเครือข่ายที่เป็นแบบดาว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2.2. ประเภทการทำงานของอุปกรณ์

โมดูล ZigBee แบ่งตามลักษณะการทำงาน 3 แบบ คือ

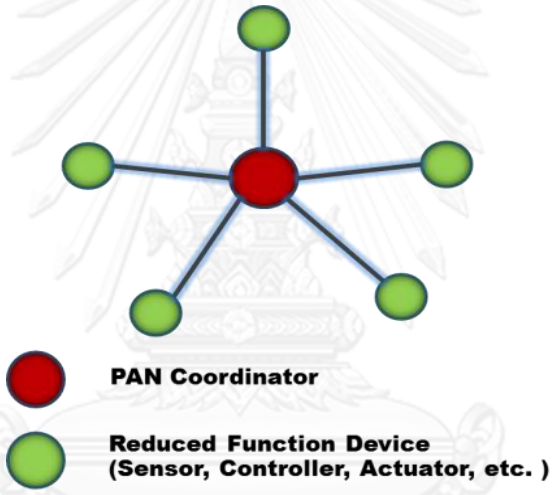
- Coordinator มีหน้าที่สร้างเครือข่ายการสื่อสาร เชื่อมโยงเครือข่ายระหว่าง End Device กับ Router หรือ Coordinator กับ Coordinator ด้วยกัน หรือ Coordinator กับ Router กำหนด address ให้กับ device ที่อยู่ในวงเครือข่ายไม่ให้ซ้ำกันและดูแลจัดการเรื่องการ Routing เส้นทาง
- Router มีหน้าที่ทำหน้าที่จัดการเส้นทางของข้อมูลที่ส่งผ่านภายในเครือข่ายการสื่อสารระหว่างคู่ของโนดใดๆ ในเส้นทางต่างๆ ของเครือข่าย ซึ่งเทียบได้กับ FFD

- End Device เป็นอุปกรณ์ปลายทางซึ่งเป็นโนด (Node) ที่อยู่ในส่วนของผู้ใช้งาน โดยใช้พลังงานต่ำในการทำงานเทียบได้กับ RFD หรือ FFD บางกรณีขึ้นอยู่กับโนดที่ใช้

2.2.3. **รูปแบบเครือข่าย [3]**

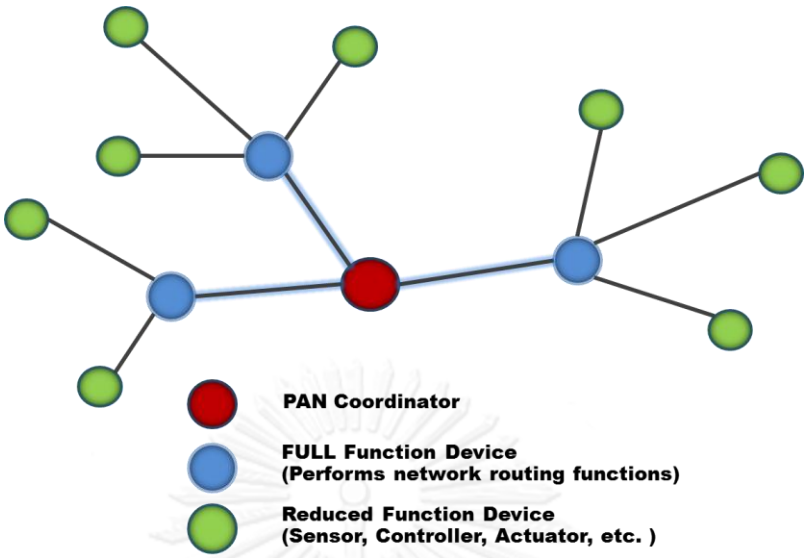
ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 รองรับรูปแบบเครือข่ายการสื่อสาร แบบคือแบบดาว 3, แบบกลุ่มโครงสร้างต้นไม้ และแบบตาข่าย

เครือข่ายแบบดาว (star) มีตัวประสานกลาง (Coordinator) เป็นศูนย์กลางในการติดต่อ โดย End Device ติดต่อกับ coordinator ได้เพียงตัวเดียว หาก End Device ต้องการส่งข้อมูลถึงกันจะส่งให้ Coordinator จากนั้น Coordinator ส่งต่อไปยัง End Device ปลายทางต่อไป



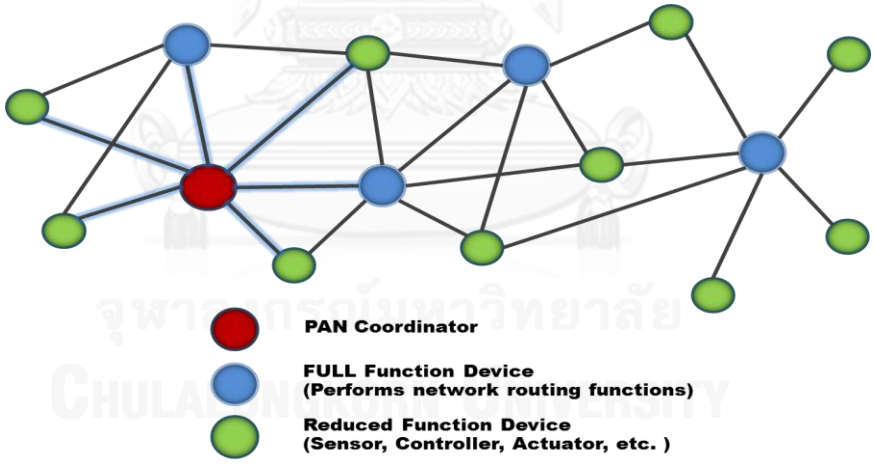
รูปที่ 2—3 เครือข่ายแบบดาว

- เครือข่ายแบบกลุ่มต้นไม้ (Cluster Tree) ลักษณะเครือข่ายจะเป็นแบบดาวหลายๆ เครือข่ายมาเชื่อมโยงกันมี Coordinator หนึ่งตัวดูแลทั้งเครือข่าย โดย End Device แต่ละตัวไม่จำเป็นต้องติดต่อผ่านทาง Coordinator การส่งข้อมูลจะติดต่อผ่านทางเร้าเตอร์ก็ได้ทำให้เพิ่มระยะทางของเครือข่ายได้ไกลมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามการติดต่อกันในชั้นเครือข่ายขึ้นไป (มีหลายตัวประสานกลาง) ยังคงติดต่อผ่านตัว Coordinator ก่อนและ End Device แต่ละตัวไม่สามารถติดต่อกันเอง ไม่ว่าจะเป็นการติดต่อกันโดยตรง หรือติดต่อผ่านทาง Router



รูปที่ 2—4 เครือข่ายแบบกลุ่มโครงสร้างต้นไม้

- เครือข่ายแบบตาข่าย (mesh) ลักษณะเครือข่ายมีประสิทธิภาพสูงสามารถติดต่อกันได้หลายเส้นทางโดยไม่ขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ตัวใดตัวหนึ่ง อย่างไรก็ตามเครือข่ายต้องมี ZigBee Coordinator 1 ตัว เป็นตัวติดต่อกับเครือข่าย ZigBee อื่นที่อยู่รอบๆ

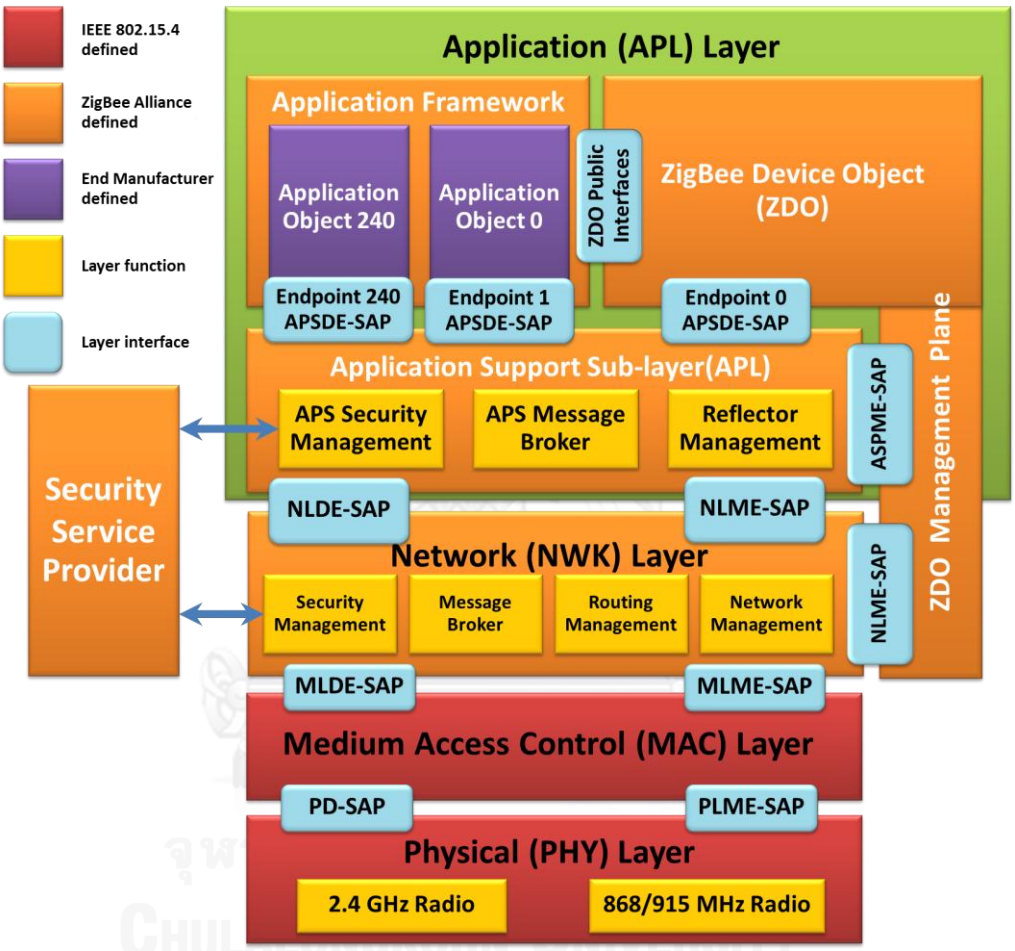


รูปที่ 2—5 เครือข่ายแบบตาข่าย

2.2.4. โครงสร้างของชุดโพรโทคอล ZigBee [3, 5]

ชุดโปรโทคอล ZigBee สำหรับติดต่อสื่อสารตามมาตรฐาน ZigBee Pro/IEEE 802.15.4 พัฒนาขึ้นมาโดย ZigBee Alliance ใช้สำหรับการสื่อสารแบบไร้สาย อัตราการส่งข้อมูลไม่สูงมาก ราคาไม่แพง และใช้พลังงานน้อย โปรโทคอล ZigBee ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะใช้ในระบบควบคุมบ้านและอาคารแบบอัตโนมัติ, ระบบควบคุมในอุตสาหกรรมต่างๆ, อุปกรณ์ต่อพ่วงกับคอมพิวเตอร์, อุปกรณ์ตรวจวัดทางการแพทย์ และของเล่นกับเกมส์ต่างๆ

ภายในโครงสร้างโพรโทคอล ZigBee มีองค์ประกอบอยู่เป็นชั้นๆโดย ZigBee Alliance นำ Physical Layer และ MAC Layer ของ IEEE 802.15.4 ซึ่งเป็นมาตรฐานการสื่อสารไร้สายแบบ WPAN (Wireless Personal Area Network) มาทำงานบนชั้น Layer ที่ต่ำกว่าเช่น เรื่องของระดับกำลังสัญญาณ, คุณภาพการเชื่อมต่อ (Link Quality), Access control, และ ความปลอดภัย (Security) รายละเอียดของแต่ละชั้นดังดังรูปที่ 2—6 เป็นดังนี้



รูปที่ 2—6 ZigBee Protocol stack

2.2.4.1. **ชั้นประยุกต์ (Application Layer: APL)**

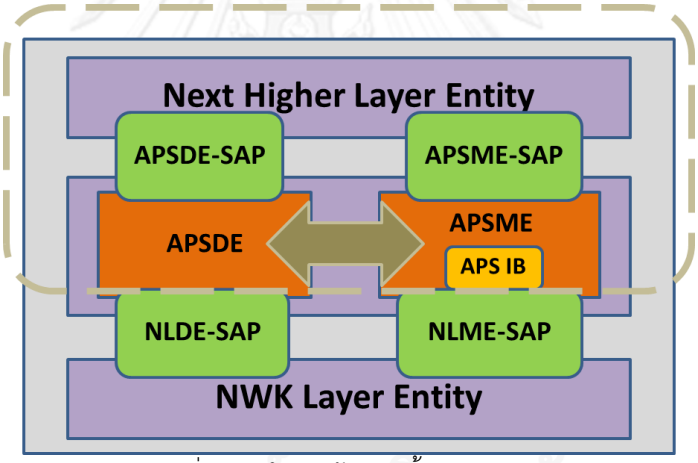
ในระดับชั้นประยุกต์เป็นชั้นสูงสุดแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนโครงสร้างงาน (Application framework), ZDO และชั้นสนับสนุนย่อย ในส่วนโครงสร้างงานผู้ใช้สามารถกำหนดการทำงานหรือออบเจ็กต์งานชั้นประยุกต์ (Application object หรือ End point) ได้ตั้งแต่ 1-240 End point ต่ออุปกรณ์ 1 ตัว

2.2.4.1.1. โครงสร้างงานประยุกต์ (Application framework)

มาตรฐานของ Zigbee ให้ทางเลือกในการใช้ Application Profile เพื่อให้เกิดความเข้ากันได้ระหว่างอุปกรณ์ที่ผลิตจากผู้ผลิตที่ต่างกัน โดยแต่ละ Application Profile ถูกกำหนดด้วยตัวระบุขนาด 16 bit ที่เรียกว่า Profile Identifier ค่านี้ผู้ผลิตอุปกรณ์ขอจาก Zigbee Alliance ซึ่ง Zigbee Alliance จะพิจารณาจาก Application Profile ที่ส่งไป หากตรงกับข้อกำหนดที่วางไว้ก็จะออก Profile Identifier ที่เหมาะสมให้ เช่นสำหรับผู้ผลิตอุปกรณ์ที่ใช้งานทางด้านบ้านอัตโนมัติจะใช้ Application Profile ที่เป็นแพลตฟอร์มร่วม (Common Platform) สำหรับบ้านอัตโนมัติ (Home Automation; HA) เพื่อให้สามารถติดต่อกันได้

2.2.4.1.2. **ชั้นสนับสนุนย่อย**

ชั้นสนับสนุนย่อยเป็นชั้นที่เชื่อมต่อระหว่างชั้นประยุกต์และชั้นเครือข่าย รองรับการร้องขอบริการจากส่วนโครงสร้างงานประยุกต์ และ ZDO มีหน้าที่หลัก 2 ส่วน ดังนี้



รูปที่ 2—7 โครงสร้างของชั้นสนับสนุนย่อย

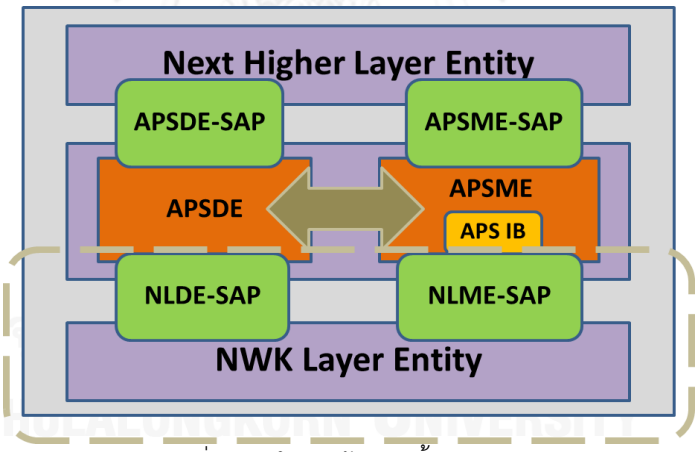
- ส่วนที่ดูแลด้านข้อมูล (APSDE) มีหน้าที่ สร้าง Overhead เพิ่มเข้าไปในข้อมูลเพื่อช่วยในการติดต่อสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ภายในชั้นประยุกต์, รับส่งข้อมูลถึงกันเมื่ออุปกรณ์ทั้งสองได้เชื่อมต่อกันแล้ว, เพิ่มความน่าเชื่อถือในการส่งข้อมูลเพิ่มขึ้นจากชั้นเครือข่าย และปฏิเสธข้อมูลที่ได้รับหากข้อมูลนั้นเคยรับมาก่อนหน้านี้
- ส่วนจัดการการส่งข้อมูล (APSME) มีหน้าที่ เชื่อมต่ออุปกรณ์เข้าด้วยกันพร้อมที่จะรับส่งข้อมูลหากอุปกรณ์ทั้งสองต้องการติดต่อสื่อสารกัน และมีระบบความปลอดภัย ด้วยการใส่รหัสผ่านเพื่อความปลอดภัยของข้อมูลที่ส่ง

2.2.4.1.3. **ZigBee Device Object (ZDO)**

ทำหน้าที่รับผิดชอบงานพื้นฐานเป็นตัวเชื่อมระหว่างโครงสร้างงานประยุกต์และชั้นสนับสนุนย่อย หน้าที่ของ ZDO ได้แก่ เริ่มการทำงานของชั้นประยุกต์ และให้บริการด้านความปลอดภัย ZDO มีส่วน ZDP (Zigbee device profile) ซึ่งคล้ายกับ Application Profiles ที่กำหนดในชั้นโครงสร้างงานประยุกต์ ความแตกต่างระหว่าง Application Profile และ ZDP คือ Application Profile ถูกสร้างเพื่อรองรับการทำงานอย่างใดอย่างหนึ่งโดยเฉพาะ แต่ ZDP จะกำหนดความสามารถให้อุปกรณ์ในเครือข่าย Zigbee เช่นถ้า ZDP กำหนดเป็น Coordinator อุปกรณ์นั้นสามารถสร้างเครือข่ายได้ ถ้า ZDP กำหนดเป็น Router อุปกรณ์นั้นสามารถส่งผ่านข้อมูลได้ เป็นต้นนอกจากนั้น ZDO ยังทำหน้าที่รวบรวมข่าวสารของเครือข่ายเพื่อค้นหาอุปกรณ์ Zigbee ตัวอื่น, จัดการเครือข่าย และการผูกกันระหว่างอุปกรณ์ (binding)

2.2.4.2. **ชั้นเครือข่าย (Network layer: NWK)**

เป็นชั้นที่อยู่ระหว่างชั้นสนับสนุนย่อยและชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อกลาง (MAC Layer) การทำงานที่สำคัญของชั้นนี้เกี่ยวกับการจ่ายที่อยู่และการจัดการเส้นทางข้อมูล โดยทำหน้าที่ให้บริการ 2 ส่วนได้แก่



รูปที่ 2—8 โครงสร้างของชั้นเครือข่าย

- ส่วนที่ดูแลด้านข้อมูล (NLDE) มีหน้าที่สร้างส่วนหัว (Overhead) เพิ่มเข้าไปในแพ็คเกจเพื่อใช้ในการติดต่อสื่อสารภายในระดับชั้นเครือข่าย และจัดการเส้นทางส่งข้อมูลไปยังปลายทางที่ถูกต้อง
- ส่วนจัดการการส่งข้อมูล (NLME) มีหน้าที่เริ่มต้นการทำงานของอุปกรณ์เป็น Coordinator ซึ่งเริ่มต้นจัดตั้งเครือข่าย, ขอเข้าร่วมเครือข่ายหากมีเครือข่ายอยู่แล้ว หรือขอเข้าร่วมเครือข่ายอีกครั้งหากการเชื่อมต่อหลุดไป, รวมถึงขอออกจากเครือข่าย ในส่วนนี้ยังทำการแจกเลขที่

อยู่ให้กับอุปกรณ์ที่เข้าร่วมเครือข่ายเพื่อใช้ในการติดต่อสื่อสาร, ค้นหาและบันทึกเส้นทางอุปกรณ์ที่อยู่ใกล้เคียงนำมาเป็นข้อมูลในการจัดการเส้นทางเพื่อให้การส่งข้อมูลให้มีประสิทธิภาพ โดยสามารถส่งข้อมูลได้ทั้งแบบ Unicast, Broadcast และ Multicast

2.2.4.3. **ชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อกลาง (MAC layer) และชั้นกายภาพ (PHY layer) ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4**

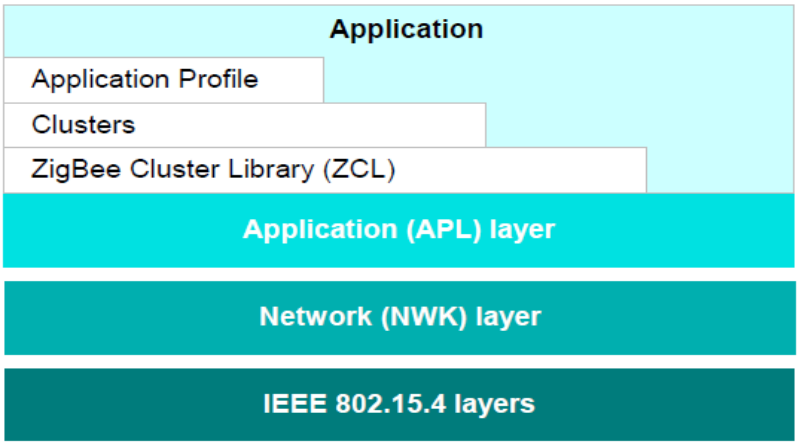
หน้าที่ของชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อกลางและชั้นกายภาพตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 จะเกี่ยวข้องกับการกระตุ้นการทำงานหรือหยุดทำงานของตัวรับส่ง, ตรวจจับความแรงของสัญญาณ (Energy Detection), แสดงคุณภาพการเชื่อมต่อ (Link Quality Indicator : LQI), การเลือกช่องสัญญาณ, ประเมินความชัดเจนของช่องสัญญาณ, รับส่งแพ็คเกจข้อมูลผ่านตัวกลางกายภาพโดยใช้ความถี่วิทยุในการสื่อสาร และใช้กลไก CSMA/CA (carrier sense multiple access with a collision avoidance) ในการเข้าใช้สื่อกลางร่วมกัน โดยสามารถใช้งานได้ทั้งหมด 3 ย่านความถี่ ดังนี้

1). ย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิร์ตซ์ มี 16 ช่องสัญญาณ อัตรารับส่งข้อมูล 250 Kbps
2). ย่านความถี่ 915 กิกะเฮิร์ตซ์ มี 10 ช่องสัญญาณ อัตรารับส่งข้อมูล 40 Kbps
3). ย่านความถี่ 868 กิกะเฮิร์ตซ์ มี 1 ช่องสัญญาณ อัตรารับส่งข้อมูล 20 Kbps

2.2.5. **ZigBee Smart Energy Profile [6, 7]**

โปรไฟต์ (Profile 0x0109) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ใช้กำหนดลักษณะอุปกรณ์และวิธีปฏิบัติที่เป็นมาตรฐานสำหรับการตอบสนองความต้องการ และการจัดการโหลดซึ่งร่วมเรียกว่าพลังงาน" อัจฉริยะ (Smart Energy, SE) "เหมาะนำมาประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับ ที่พักอาศัย หรือสภาพแวดล้อมเชิงพานิชย์ที่จัดการได้ง่าย โดยระยะแผนการติดตั้งเริ่มจากบ้านหลังหนึ่งไปจนถึงห้องชุดในตึกขนาดใหญ่ทั้งหมด ขอบเขตการใช้งานที่สำคัญในเวอร์ชั่นแรกนี้มีการประยุกต์การใช้งานการวัด, การกำหนดราคา, การตอบสนองความต้องการ และการควบคุมโหลด การใช้งานอื่นๆจะถูกเพิ่มในเวอร์ชั่นอนาคต

โปรไฟต์ที่ใช้เป็นส่วนที่พัฒนาเพิ่มขึ้นจาก ZigBee PRO Protocol Stack โดยได้พัฒนาส่วนที่เป็นการประยุกต์ใช้งาน (Application) โดยการเพิ่มส่วนที่เป็นคลัสเตอร์ (Cluster) และเพิ่มส่วนที่เป็น ZigBee Cluster Library (ZCL) มีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2—9 โครงสร้างของ ZigBee PRO Stack

ZigBee Alliance ได้มีการประกาศให้ทราบถึง โปรไฟต์การใช้งานสำหรับพลังงานอัจฉริย โดยทั่วไปเข้าใจว่าโปรไฟต์การใช้งานพลังงานอัจฉริยะเหมาะที่จะใช้ เพื่อผู้ผลิตต่างๆที่หวังจะพัฒนาผลิตภัณฑ์พลังงานอัจฉริยะสำหรับเครือข่าย ZigBee

สิ่งทั่วไปที่บ่งชี้ให้ทราบเกี่ยวกับการดำเนินการของ ZigBee Samrt Energy Profile มีดังต่อไป

1). ในการสแกนหาช่องสัญญาณ จุดเชื่อมต่อพลังงานอัจฉริยะ (Smart Energy Node) ควรควบคุมตัวมันเองเพื่อให้ได้ค่าความถี่ช่องสัญญาณ 2.4 กิกะเฮิร์ตซ์ โดยมีช่องสัญญาณคือ 11, 14, 15, 19, 20, 24, 25 ซึ่งเป็นการหลีกเลี่ยงการคาบเกี่ยว (over lap) กับความถี่ของระบบ Wi-Fi ใกล้เคียง

2). การส่งสัญญาณไม่แนะนำให้ส่งสัญญาณด้วยวิธี Broadcasts ในเครือข่ายพลังงานอัจฉริยะและถูกจำกัดไม่ให้มีการ Broadcasts มากกว่าหนึ่งครั้งต่อวินาที

3). เครือข่าย ZigBee PRO Smart Energy กำหนดให้ใช้โหมดรักษาความปลอดภัยที่เป็นมาตรฐาน (Standard Security mode) ของโพรโทคอลของ ZigBee PRO กับการส่งของ link keys

2.2.5.1. ZigBee Cluster Library (ZCL)

แม้ว่าคลัสเตอร์ถูกกำหนดโปรไฟต์การใช้งาน (Application Profile) แน่นอนว่าคลัสเตอร์นั้นมีประโยชน์ในทุกๆโปรไฟต์การใช้งานดังนั้น ZigBee Alliance จึงได้มีการกำหนดจำนวนคลัสเตอร์ที่เป็นมาตราฐานไว้สำหรับพื้นที่ใช้งานที่แตกต่างกัน โดยมีการเก็บข้อมูลไว้ด้วยกันใน ZCL ยกตัวอย่าง เช่น โปรไฟต์พลังงานอัจฉริยะ (Smart Energy profile) ที่ใช้คลัสเตอร์ทางเวลาจาก ZCL ในตาราง 2—1 เพื่อการประสานเวลาของจุดเชื่อมต่อ (Node) ต่างๆที่อยู่ในเครือข่ายพลังงานอัจฉริยะ ดังนั้น ZCL สามารถใช้งานร่วมกับการประยุกต์ใช้งานต่างๆเพื่อการติดต่อสื่อสาร ซึ่ง ZCL ได้กำหนดส่วนที่เป็นเฮดเดอร์ และส่วนเนื้อหาข้อมูล (payload) ใช้สำหรับข้อมูลที่มีรูปแบบพิเศษ (messages) เช่น

event, คำขอ และการติดต่อระหว่างจุดเชื่อมต่อ นอกจากนี้ ZCL ยังกำหนดประเภท Attribute เช่น ints, strings และยังกำหนดคำสั่งทั่วไป เช่น สำหรับการอ่านค่า attribute ต่างๆ [6, 7]

ZigBee Smart Energy Profile ใช้คลัสเตอร์บางตัวจาก ZCL ซึ่ง ZigBee Smart Energy Profile ยังกำหนดบางส่วนของคลัสเตอร์ด้วยตัวมันเอง โดยคลัสเตอร์ทั้งหมดใช้โปรไฟต์พลังงานอัจฉริยะ ซึ่งอยู่ในตาราง 2—1 จะเห็นว่าคลัสเตอร์จาก ZCL จะแบ่งเป็นส่วนที่เรียกว่า General และคลัสเตอร์ที่กำหนดโดยรูปแบบพลังงานอัจฉริยะ ถูกแบ่งเป็นส่วนที่เรียกว่า Smart Energy ดังระบุไว้ในตาราง 2—1 [5-7]

ตาราง 2—1 SE Profile Clusters

Category	Cluster	Cluster ID
General (from ZCL)	Basic	0x0000
	Identity	0x0003
	Alarms	0x0009
	Time	0x000A
	Commissioning	0x0015
	Power Configuration	0x0001
Smart Energy	Price	0x0700
	Demand-Response and Load Control	0x0701
	Simple metering	0x0702
	Messaging	0x0703
	Key Establishment	0x0800

คลัสเตอร์ต่างๆดังที่ได้ระบุในตาราง 2—1 แบ่งเป็น 2 ส่วนได้ดังนี้

2.2.5.1.1. ส่วนที่เป็น General ประกอบด้วย

- Basic cluster ประกอบไปด้วย คุณสมบัติขั้นพื้นฐานของอุปกรณ์ เช่น ซอฟแวร์ และ ฮาร์ดแวร์ และอนุญาตการติดตั้งของคุณลักษณะที่ถูกกำหนดโดยผู้ใช้
- Identify cluster ทำให้ผู้ติดตั้งทราบว่าอุปกรณ์นั้นอยู่ที่ตำแหน่งไหนโดยมีสัญญาณแสดงให้เห็น เช่นไฟกระพิบ เป็นต้น
- Alarms cluster ถูกใช้เพื่อส่งข้อมูลการแจ้งเตือน และปรับค่าโดยทั่วไปของการแจ้งเตือนสำหรับ cluster ตัวอื่นบนอุปกรณ์ โดยแต่ละเงื่อนไขของการแจ้งเตือนจะถูกเซตด้วยคลัสเตอร์ที่เกี่ยวข้องกัน
- Time cluster จะทำการเชื่อมประสาน (Interface) เพื่อให้เป็นเวลาจริงบนอุปกรณ์ ซึ่งถูกอ่านและเขียนเพื่อให้เชื่อมประสานเวลากับเวลามาตรฐานใช้หน่วยที่เป็นวินาที โดยเริ่มตั้งแต่

ศูนย์ชั่วโมง ศูนย์นาที ศูนย์วินาที คือ วันที่ 1 มกราคม 2000 ตามเวลาสากล (Universal Coordinated Time,UTC) คลัสเตอร์ตัวนี้รวมฟังชั่นเสริมสำหรับเวลาท้องถิ่นและ daylight saving time ด้วย

- Commissioning cluster ถูกเลือกใช้สำหรับการควบคุมของ ZigBee Stack บนอุปกรณ์ ในระหว่างการติดตั้งเครือข่าย และการกำหนดพฤติกรรมของอุปกรณ์ ที่เกี่ยวข้องกับเครือข่าย ZigBee

- Power Configuration cluster ประกอบด้วยคุณลักษณะของแหล่งพลังงานของอุปกรณ์ ซึ่งสามารถเป็นได้ทั้งไฟหลักหรือไฟสำรอง (แบตเตอรี่) และยอมให้มีการปรับค่า ของการแจ้งเตือนแรงดันตกหรือแรงดันเกิน

2.2.5.1.2. ส่วนที่เป็น Smart Energy ประกอบด้วย

- Price cluster จัดการกลไกสำหรับการส่งและการรับ pricing information ภายในเครือข่าย พลังงานอัจฉริยะโดย pricing information จะถูกส่งโดย Utility company ไปยัง coordinator แล้วผ่านข้อมูลไปยังอุปกรณ์พลังงานอัจฉริยะ (Smart Energy Device)

- Demand-Response and Load Control cluster เป็นตัวจัดการเชื่อมประสานสำหรับการควบคุมเครื่องใช้ที่เพิ่มเข้ามา ซึ่งตัวมันรองรับการควบคุมโหลด คลัสเตอร์ตัวนี้สามารถรับการร้องขอการควบคุมโหลด จาก Utility company

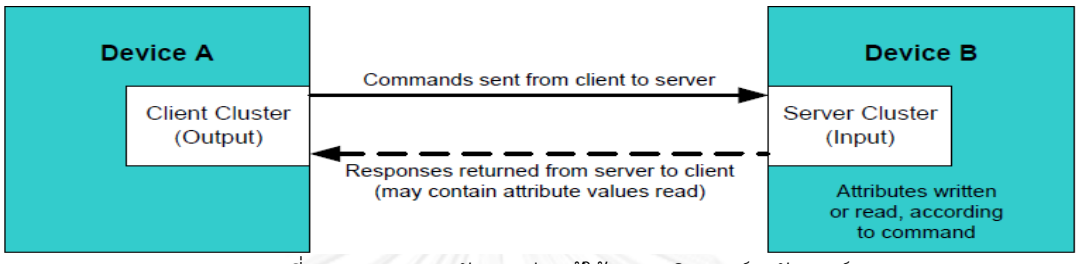
- Simple Metering cluster เป็นตัวจัดการเพื่อให้ได้ข้อมูลการใช้พลังงานต่างๆ จากอุปกรณ์การวัดเช่น ไฟฟ้า, แก๊ส, น้ำ, และพลังงานความร้อน

- Messaging cluster เตรียมการเชื่อมต่อประสานสำหรับส่งผ่าน text messages ระหว่าง ZigBee Smart Energy Devices ที่เป็น messages จาก Utility company และถูกรับข้อมูลโดย Coordinator โดยการส่ง messages เป็นแบบ unicast โดยรับ messages ส่งไปยังรีจิสเตอร์ของอุปกรณ์พลังงานอัจฉริยะทั้งหมด การดำเนินการของ Messaging cluster สำหรับการจัดเก็บ messages ล่าสุด เพียงหนึ่ง messages เท่านั้นที่สามารถถูกจัดการได้ ณ เวลาขณะนั้น และ message ที่รับเข้ามา ณ ขณะนั้นจะถูกแทนที่เมื่อ message ถัดไปมาถึง

- Key Establishment cluster ถูกนำมาใช้เพื่อจัดการความปลอดภัยของสื่อสารต่างๆใน ZigBee เมื่อความปลอดภัยของเครือข่ายพื้นฐาน (underlying network security) ไม่น่าเชื่อถือได้ ดังนั้น key agreement scheme จะถูกใช้ เพื่อร้องขอแลกเปลี่ยน keying information ระหว่างอุปกรณ์การสื่อสาร

2.2.5.2. **กลุ่มเก็บข้อมูล (Clusters) [5-7]**

การประยุกต์ใช้งาน ZigBee ใช้คลัสเตอร์เพื่อการติดต่อค่า Attribute ซึ่งคลัสเตอร์ประกอบด้วยชุดของ Attributes ที่เกี่ยวข้องร่วมกับชุดคำสั่ง คลัสเตอร์นั้นมีสองฝั่งมีความเกี่ยวข้องกันระหว่างการรับและการส่งชุดคำสั่ง ไม่ว่าการรับหรือการส่งถูกประยุกต์ใช้ในงาน ZigBee แสดงในรูปที่ 2—10 และอธิบายดังต่อไปนี้



รูปที่ 2—10 การคุยกันระหว่าง ผู้ใช้ และ เซิพเวอร์ คลัสเตอร์

- ด้านผู้บริการ หรือคลัสเตอร์นำเข้า (Input cluster) ฝั่งผู้บริการคลัสเตอร์นี้ถูกใช้เพื่อเก็บ Attributes และรับคำสั่งเพื่อจัดการ Attributes ที่ถูกเก็บเช่น ผู้บริการคลัสเตอร์บนอุปกรณ์การวัด (Metering Device) ฉะนั้นจำเป็นต้องเก็บ Attribute ที่เรียกว่าการใช้พลังงาน นอกจากนี้ผู้บริการคลัสเตอร์ตอบสนองต่อคำสั่งจากผู้ใช้ซึ่งร้องขอการอ่านค่าของ Attribute เหล่านี้
- ด้านผู้ใช้ หรือคลัสเตอร์นำออก (Output cluster) คลัสเตอร์ส่วนนี้จะถูกใช้เพื่อจัดการ Attributes ในผู้บริการคลัสเตอร์ที่สัมพันธุ์กัน โดยการส่งคำสั่งไปยังผู้บริการคลัสเตอร์ และรอรับการตอบกลับ

2.2.5.3. **ประเภทข้อมูล (Attributes) [5-7]**

ถูกกำหนดไว้สำหรับทั้งด้านไคลเอนต์ (ด้านผู้ใช้) และด้านเซิร์ฟเวอร์ (ด้านผู้บริการ) โดยประเภทข้อมูล (Attributes) สามารถใช้ทำความเข้าใจสถานะปัจจุบันของกิจกรรมภายในอุปกรณ์เสริมทั้งการตรวจสอบและการบำรุงรักษาของอุปกรณ์หรือกระบวนการที่ถูกส่งเสริมโดยอุปกรณ์นั้นๆ

2.2.5.4. **ZigBee Smart Energy Devices [5]**

อุปกรณ์พลังงานอัจฉริยะถูกกำหนดไว้ในรูปแบบของคลัสเตอร์ ซึ่งบางคลัสเตอร์ที่ใช้เป็นประจำจะอยู่ร่วมกันในทุกอุปกรณ์พลังงานอัจฉริยะ ซึ่งได้แสดงในตาราง 2—2 สำหรับอุปกรณ์แต่ละอย่างจะมีคลัสเตอร์บังคับใช้ (Mandatory cluster) และคลัสเตอร์ทางเลือก (Optional cluster) และคลัสเตอร์ที่แตกต่างกันสำหรับฝั่งผู้บริการ และฝั่งผู้ใช้ของอุปกรณ์

ตาราง 2—2 คลัสเตอร์ทั้งหมดของอุปกรณ์ SE ที่ใช้ร่วมกัน

Server (Input) Side	Slient (Output) Side
Mandatory	
Basic	
Identity	
Key Establishment	Key Establishment
Optional	
Cluster with reporting capability	Cluster with reporting capability
Power Configuration	
Inter-PAN Communication	Inter-PAN Communication
Alarms	
Commissioning	Commissioning
Manufacturer-specific	Manufacturer-specific

อุปกรณ์พลังงานอัจฉริยะ อาจใช้หนึ่งคลัสเตอร์หรือมากกว่า ซึ่งนำมาจากการตอบสนองความต้องการ และการควบคุมโหลด, Messaging, อุปกรณ์วัดอย่างง่าย (Simple Metering), และราคา

ต่อไปนี้เป็นตัวอย่างการประยุกต์ใช้คลัสเตอร์ ZigBee Smart Energy Devices ที่ทำงานร่วมกัน ซึ่งแสดงความสัมพันธุ์ของ ZigBee Smart Energy Devices ระหว่าง Coordinator และอุปกรณ์การวัด (Simple Metering) สำหรับคลัสเตอร์ที่ถูกระบุในตาราง 2—2 Coordinator สามารถรองรับคลัสเตอร์ที่ระบุในตาราง 2—3 ถ้าเป็นคลัสเตอร์ส่วนที่ไม่ได้ระบุในตาราง 2—3 คลัสเตอร์นั้นจะถูกยับยั้งบน Coordinator ปลายทาง

ตาราง 2—3 คลัสเตอร์ที่ถูกรองรับโดย Coordinator

Server Side	Slient Side
Mandatory	
Message	
Price	
Demand-Response and Load Control	
Time	
Optional	
Smart Energy Tunneling	Cluster with reporting capability

(Complex Metering)	
	Price
Simple Metering	Simple metering
Prepayment	Prepayment

สำหรับคลัสเตอร์ที่ระบุในตาราง 2—2 อุปกรณ์การวัดสามารถรองรับคลัสเตอร์ที่ระบุในตาราง 2—4 ถ้าเป็นคลัสเตอร์ส่วนที่ไม่ได้ระบุในตาราง 2—4 คลัสเตอร์จะถูกห้ามบน อุปกรณ์การวัดปลายทาง

จากตาราง 2—4 อุปกรณ์การวัด ใช้การวัดอย่างง่าย (Simple Metering) ตามที่ระบุในคลัสเตอร์บังคับตลอดจนเวลา, ราคา และการส่งข้อความตามที่ระบุในคลัสเตอร์ทางเลือกฝั่งผู้ใช้

ตาราง 2—4 คลัสเตอร์ที่ถูกรองรับโดยอุปกรณ์การวัด

Server Side	Client Side
Mandatory	
Simple Metering	
Optional	
Smart Energy Tunneling (Complex Metering)	
	Time
	Prepayment
	Price
	Message

จากตาราง 2—3 และ ตาราง 2—4 แสดงการติดต่อระหว่างฝั่งบริการ และฝั่งผู้ใช้โดยยกตัวอย่างการติดต่อข้อมูลระหว่าง Coordinator กับอุปกรณ์การวัด สมมุติว่าทาง Coordinator ต้องการข้อมูลจาก Simple Metering ซึ่งข้อมูลชุดนี้จะอยู่ในคลัสเตอร์บังคับฝั่งผู้ใช้ของอุปกรณ์การวัดโดยค่าที่วัดได้จากตัวอุปกรณ์การวัดจะถูกส่งไปยัง Coordinator โดยการสื่อสารกันของอุปกรณ์การวัดอย่างง่าย (Simple Metering) ฝั่งผู้บริการกับ Coordinator ฝั่งผู้ใช้

2.2.6. **ZigBee Smart Energy Security [6, 7]**

การสื่อสารภายในเครือข่ายพลังงานอัจฉริยะถูกทำให้ปลอดภัยเพื่อปกป้องเครือข่ายจากการรบกวนโดยเจตนาและไม่เจตนา ด้วยเหตุนี้ ZigBee PRO ประกอบด้วยจำนวนคุณสมบัติเฉพาะของการรักษาความปลอดภัย นอกจากนี้รูปแบบการใช้พลังงานอัจฉริยะได้ปรับปรุงด้านความปลอดภัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างรหัสความปลอดภัย (security keys) ที่ใช้ในเครือข่ายการสื่อสาร

2.2.6.1. **ZigBee PRO Security [6, 7]**

ZigBee PRO มีลักษณะเริ่มต้นที่แยกเครือข่ายจากเครือข่ายใกล้เคียงโดยมั่นใจว่าไม่มีการครอสโอเวอร์ (cross-over) ของเครือข่ายในช่วงที่เครือข่ายเริ่มทำงานขึ้นซึ่ง Coordinator ดำเนินขั้นตอนต่อไปนี้

- ทำการตั้งค่า 64 บิต ของ Extended Personal Area Network Identification (Extended PAN ID; EPID) สำหรับเครือข่ายนำมาจากเลขที่อยู่ของ MAC/ IEEE ของ Coordinator ทำให้สามารถระบุเครือข่ายได้โดยเฉพาะ
- ค้นหาช่องวิทยุที่อนุญาตเพื่อเลือกช่องสัญญาณที่จะใช้งานซึ่งโดยปกติควรเป็นช่องสัญญาณที่มีการใช้งานน้อยที่สุด เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงการปะทะกับเครือข่ายอื่นๆ
- สุ่มเลือก PAN ID ขนาด 16-บิต สำหรับเครือข่ายเพื่อให้มั่นใจว่าค่าที่ถูกเลือกนั้นไม่มีการชนกับ PAN ID ของเครือข่าย ZigBee อื่น ๆ ในช่องทางเดียวกัน

มาตรการดังกล่าวควรที่จะปกป้องเครือข่าย ZigBee จากการแทรกแซงการชนกันจากเครือข่าย ZigBee อื่นๆในบริเวณใกล้เคียง

ประเภทของความปลอดภัยที่สำคัญถูกนำมาใช้ในการเข้ารหัส (encryption) ของ ZigBee PRO ได้แก่

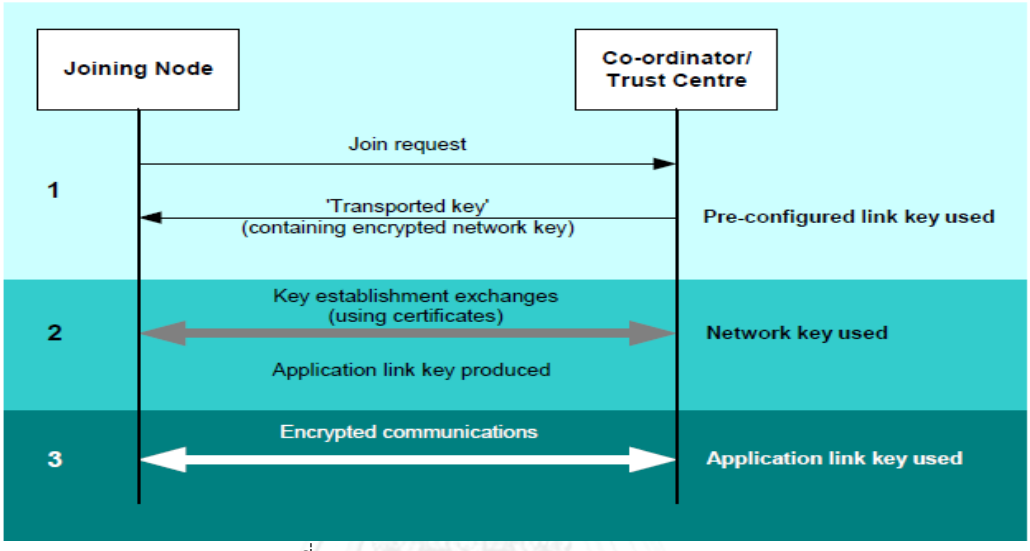
- รหัสเครือข่าย (Network Key) คือรหัสเครือข่ายนี้จะถูกสร้างขึ้นแบบสุ่มโดย Coordinator และถูกใช้ร่วมกันโดยจุดเชื่อมต่อของเครือข่ายทั้งหมด รหัสเครือข่ายยังถูกใช้เพื่อรักษาความปลอดภัยการสื่อสารทั้งหมดระหว่างจุดเชื่อมต่อ
- Application link key คือเป็นรหัสเชื่อม (Link Key) เฉพาะสำหรับแต่ล่ะคู่ของจุดเชื่อมต่อที่กำลังติดต่อสื่อสารโดย Application link key เตรียมความปลอดภัยระดับสูงซึ่งจะถูกใช้ในการเข้าถึง Smart Energy Cluster เช่นการวัดอย่างง่าย, ราคา, และ Messaging

2.2.6.2. **Smart Energy Security [6, 7]**

อุปกรณ์ที่เป็น ZigBee PRO Smart Energy ถูกร้องขอเพื่อใช้ Application Link Keys สำหรับการสื่อสารที่มีการเข้ารหัสระหว่างคู่ของจุดเชื่อมต่อ โดยรูปแบบการใช้พลังงานอัจฉริยะมีการเตรียม Key Establishment Cluster ซึ่งมีผลบังคับใช้สำหรับอุปกรณ์ทั้งหมดเพื่อสร้าง Application Link Keys ที่มีคุณสมบัติเฉพาะ เพื่อที่จะสร้าง Application Link Key ระหว่าง Coordinator และการเข้าร่วมจุดเชื่อมต่อ (Joining Node) ของอุปกรณ์พลังงานอัจฉริยะ จำเป็นต้องใช้สิ่งต่อไปนี้

- มี Pre-configured Link Key สำหรับการเข้าร่วมจุดเชื่อมต่อ
- ใบรับรองความปลอดภัย (Security certificates) สำหรับการเข้าร่วมจุดเชื่อมต่อและ Coordinator

วิธีการขอรับ Pre-configured Link Key และใบรับรองความปลอดภัยอยู่ในหัวข้อส่วนที่เป็น Pre-configured Link Key และ Security Certificate ได้อธิบายไว้ด้านล่าง ขั้นตอนด้านล่างอธิบายการเกิดของ Application Link Key ซึ่งแสดงในรูปที่ 2—11 ในกระบวนการนี้ Pre-configured Link Key และ ใบรับรองการรักษาความปลอดภัยที่จะใช้สมมุติว่าได้รับแล้ว



รูปที่ 2—11 Application Link Key Establishment

ดำเนินการดังต่อไปนี้

- Joining Node ส่งคำร้องขอเข้าร่วม (Join request) ไปยัง Coordinator ซึ่งทาง Coordinator จะส่ง Transported Key ประกอบด้วยรหัสเครือข่ายที่ถูกถอดรหัสโดยใช้ Pre-configured Link Key ของจุดเชื่อมต่อที่เข้าร่วมใหม่
- จากนั้น Key Establishment Cluster บน Joining node ใช้ใบรับรองความปลอดภัยของจุดเชื่อมต่อทั้งสอง (Joining Node และ Coordinator) เพื่อสร้าง Application Link Key ผ่านลำดับของการแลกเปลี่ยนกับ Coordinator และลำดับของการแลกเปลี่ยนนี้ถูกเข้ารหัสโดยใช้รหัสเครือข่าย
- เมื่อ Application Link Key ถูกสร้างสามารถนำมาใช้ในการเข้ารหัสการสื่อสารระหว่าง Joined Node และ Coordinator โดยลำดับ

2.2.6.2.1. **Pre-configured Link Key [5-7]**

การติดตั้งความปลอดภัยของพลังงานอัจฉริยะต้องการใช้ Pre-configured Link Key สำหรับการเข้าร่วมจุดเชื่อมต่อ โดย Link key นี้ถูกใช้ร่วมกันระหว่างการเข้าร่วมจุดเชื่อมต่อ และ Coordinator ได้อธิบายต่อไปนี้

- ในระหว่างการผลิตจุดเชื่อมต่อโดยที่จุดเชื่อมต่อนั้นจะถูกกำหนดรหัสการติดตั้ง (installation code) ซึ่งถูกพิมพ์อยู่บนป้าย (Label) ติดกับจุดเชื่อมต่อ ซึ่งรหัสการติดตั้งนี้ประกอบด้วยค่าแบบซุ่มตัวเลขฐานสิบหกดังนี้ 12, 16, 24 หรือ 32 แล้วตามด้วยเลขฐานสิบหกอีก 4 ตัวเพื่อตรวจสอบการซุ่มตัวเลขฐานสิบหกข้างต้น โดยการซุ่มตัวเลขฐานสิบหกข้างต้นถูกใช้ในลำดับกระบวนการเพื่อใช้สร้าง Pre-configured Link Key ขนาด 128 บิต ของจุดเชื่อมต่อซึ่งถูกโปรแกรมลงในหน่วยความจำแฟลชของอุปกรณ์ในระหว่างการผลิต
- ระหว่างการติดตั้งจุดเชื่อมต่อในเครือข่าย เลขที่อยู่ของ MAC ของจุดเชื่อมต่อ และรหัสการติดตั้ง (installation code) ถูกส่งไปยัง Utility company ผ่านทาง Out-of-band mechanism เช่นการโทรศัพท์หรือการลงทะเบียนทางเว็บไซต์ เมื่อ Utility company ได้ Pre-configured link key จากการซุ่มตัวเลขฐานสิบหกข้างต้น และติดตั้ง Pre-configured link key และเลขที่อยู่ของ MAC ภายใน Coordinator ของเครือข่ายพลังงานอัจฉริยะ ผ่านทางเครือข่ายหลัก (backhaul network)

2.2.6.2.2. **Security Certificate [5-7]**

การติดตั้งความปลอดภัยของพลังงานอัจฉริยะจำเป็นต้องใช้ใบรับรองความปลอดภัยแบบดิจิตอล (digital security certificates) สำหรับการเข้าร่วมจุดเชื่อมต่อและ Coordinator ใบรับรองนี้ประกอบด้วยข้อมูลต่อไปนี้ เลขที่อยู่ของ MAC ของจุดเชื่อมต่อ, issuer, Profile Attribute Data, รหัสสาธารณะ(Public key) และการลงนามของ Certificate Authority (CA) ซึ่งใบรับรองความปลอดภัยสำหรับอุปกรณ์สามารถรับจาก Certicom ทางเว็บไซต์การอ้างอิงการเชื่อมโยงหลายมิติเลขที่อยู่ของ MAC ของอุปกรณ์โดย issuer ถูกฝังในใบรับรองซึ่งเป็นตัวระบุสำหรับ Certicom ที่เป็นเลขที่อยู่เฉพาะของ MAC สำหรับบริษัทผู้ผลิต

เพิ่มเติม Certicom ได้ตีพิมพ์ใบรับรองการทดสอบและใบรับรองผลิตภัณฑ์ (Production Certificates) โดยใบรับรองผลิตภัณฑ์จะดำเนินการภายใต้ความปลอดภัยระดับสูงและเพื่อที่จะได้รับใบรับรองผลิตภัณฑ์อุปกรณ์ของคุณต้องมีใบรับรอง ZigBee Smart Energy อยู่แล้ว

2.2.7. **Zigbee Smart Energy Network [5-7]**

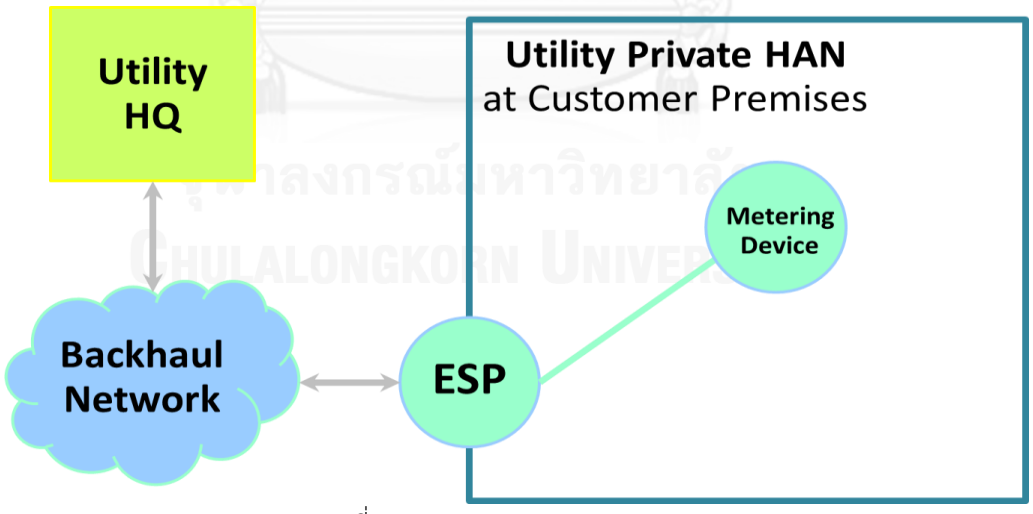
ทางด้านการตลาดของเครือข่ายพลังงานอัจฉริยะ ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์การวัด และการจัดการพลังงาน สิ่งเหล่านี้รวมในเครือข่ายพื้นที่ข้างเคียง (Neighborhood Area Networks, NAN) สำหรับมิเตอร์ ซึ่งการใช้ ZigBee สำหรับ Sub-metering ภายในบ้านหรือห้องชุดและการใช้ ZigBee เพื่อสื่อสารไปยังอุปกรณ์ภายในบ้าน โดยการติดตั้งที่แตกต่างกันและการใช้ประโยชน์จะส่งผลให้เกิดโครงสร้างเครือข่ายที่แตกต่างกันและการดำเนินงาน สำหรับโปรไฟต์นี้ (0x0109) ต้องอนุญาตสำหรับความแตกต่างเหล่านี้ด้วย อย่างไรก็ตามแต่ละเครือข่ายต้องทำงานโดยใช้หลักการขั้นพื้นฐานเดียวกัน

เพื่อให้แน่ใจว่าสามารถทำงานร่วมกัน เนื่องจากชนิดของข้อมูลและการควบคุมภายในเครือข่ายพลังงานอัจฉริยะ, การใช้งานการรักษาความปลอดภัยเป็นความต้องการที่สำคัญ โปรแกรมจะใช้ลิ้งคีย์ (Link Keys) ซึ่งเป็นตัวเลือกในโปรไฟต์ ZigBee และ ZigBee PRO แต่ลิ้งคีย์นั้นถูกใช้ภายในเครือข่ายพลังงานอัจฉริยะ ส่วนตัวประสาน (Coordinator) และอุปกรณ์ทั้งหมดในเครือข่ายพลังงานอัจฉริยะสามารถติดตั้งและการใช้คีย์เหล่านี้ตามที่อธิบายไว้ในส่วนการรักษาความปลอดภัย

เครือข่ายการวัด (Metering Network) แรกเริ่มถูกติดตั้งโดยบุคลากรที่ให้บริการโดยเฉพาะ แต่อุปกรณ์อื่นๆในเครือข่ายอาจถูกเพิ่มโดยเจ้าของบ้านหรือผู้เชี่ยวชาญทางด้านบ้านอัจฉริยะ (Home Automation, HA) โดยคนเหล่านี้อาจไม่มีความเชี่ยวชาญทาง ZigBee ใดๆโดยความคิดในการติดตั้งต้องสะดวก และตลอดผู้ผลิตอุปกรณ์พลังงานอัจฉริยะนั้นควรเป็นรูปแบบเดียวกัน

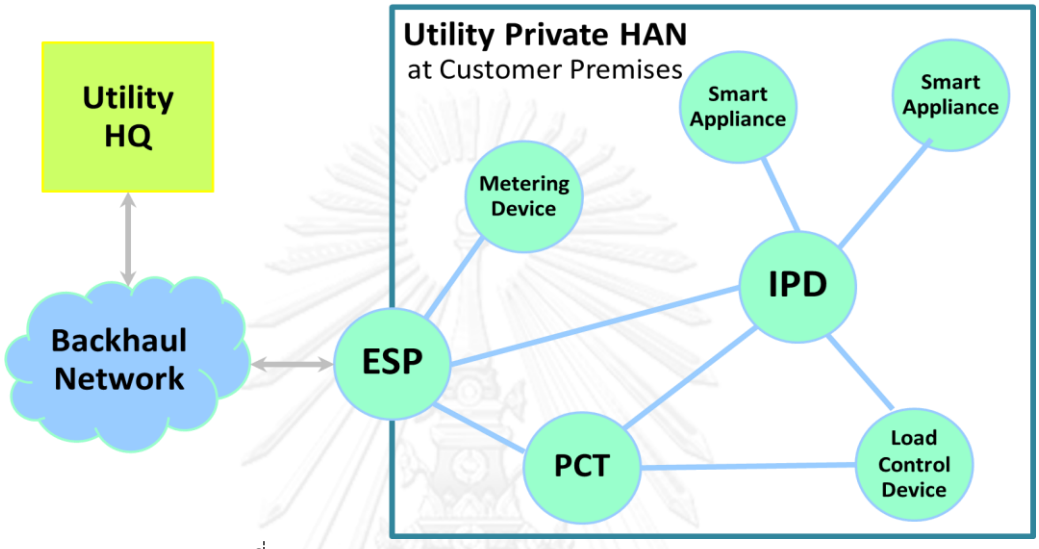
เครือข่ายพลังงานอัจฉริยะจะไม่ปฏิสัมพันธ์กับผู้บริโภคที่ใช้เครือข่าย ZigBee Home Area Network เว้นแต่อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการระดับที่เรียกว่า " Application level bridge " ระหว่างสองโปรไฟล์หรืออุปกรณ์ที่เป็น HA และตอบสนองความต้องการทางการรักษาความปลอดภัยโปรไฟต์พลังงานอัจฉริยะ

เนื่องจากความต้องการความปลอดภัยที่สูงขึ้นบนเครือข่ายพลังงานอัจฉริยะ ที่ไม่จำเป็นในเครือข่ายบ้าน แต่ก็เป็นที่คาดว่าอุปกรณ์ที่เป็น HA (Home Automation) นั้นได้ถูกใช้อย่างกว้างขวางรวมถึงโปรไฟต์พลังงานอัจฉริยะยังคงสามารถทำงานในเครือข่ายภายในบ้าน ZigBee สำหรับเครือข่ายพลังงานอัจฉริยะที่ทำให้เครือข่ายที่เป็นไปได้ดังรูปเช่น



รูปที่ 2—12 Simplest Utility Private HANs

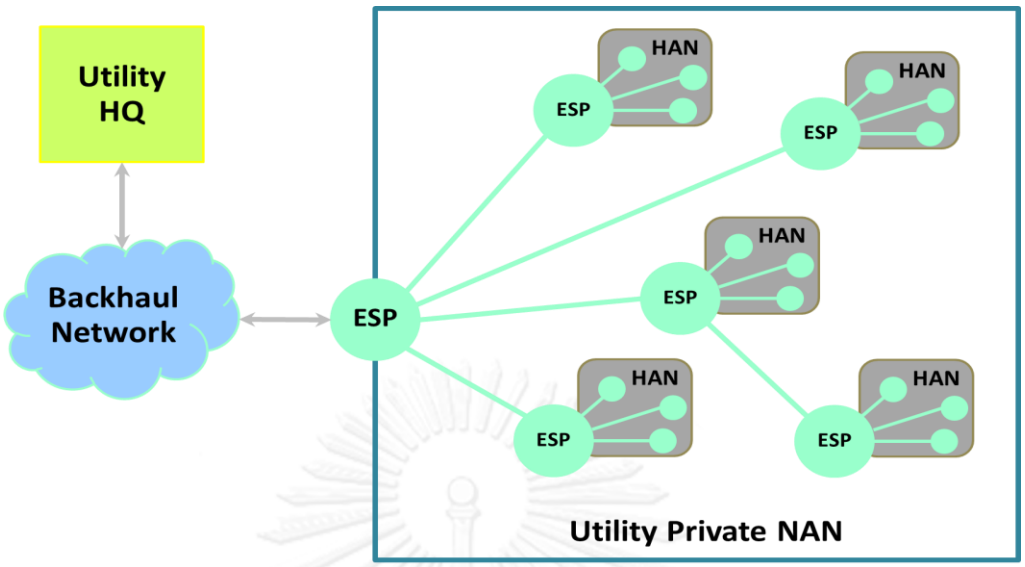
ระบบ Home Area Networks (HANs) อาจรวมถึงการแสดงข้อมูลการใช้สาธารณูปโภคภายในบ้าน (Home Display) หรืออุปกรณ์ควบคุมโหลดที่กำลังทำงานร่วมกับฐานบริการพลังงาน (Energy Service Portal, ESP) แต่มันจะไม่รวมถึงอุปกรณ์อื่นๆที่ถูกควบคุมโดยผู้บริโภค



รูปที่ 2—13 Utility Private HANs with Range of SE Devices

การใช้ประโยชน์ของภาคเอกชน (Utility Private) บนเครือข่าย ZigBee อาจถูกใช้เป็นระบบ NAN ที่ซึ่ง ZigBee ได้เตรียมการการสื่อสารหลักสำหรับการใช้งานพลังงานอัจฉริยะ

ในบางสถานการณ์ ESP ของ Utility Private ในระบบ HANs อาจไม่ได้เชื่อมต่อโดยตรงกับเครือข่าย backhaul แต่ผ่านสื่อกลางโดยผ่านพื้นที่เครือข่ายข้างเคียง (Neighbourhood Area Networks, NANs) ที่เรียกว่า“utility private NANs” สิ่งนี้อาจเป็นกรณีสำหรับห้องชุดในตึกใหญ่ ซึ่งในแต่ละห้องชุดมีการใช้ระบบแบบ HANs ที่เชื่อมต่อผ่านทางของ ESP ไปยังเครือข่ายข้างเคียงหรือ NANs สำหรับตึกใหญ่ทั้งหมด โดยเครือข่ายแบบ NANs มี ESP ซึ่งเชื่อมต่อไปยังเครือข่าย backhaul นี้จะแสดงรูปที่ 2—14



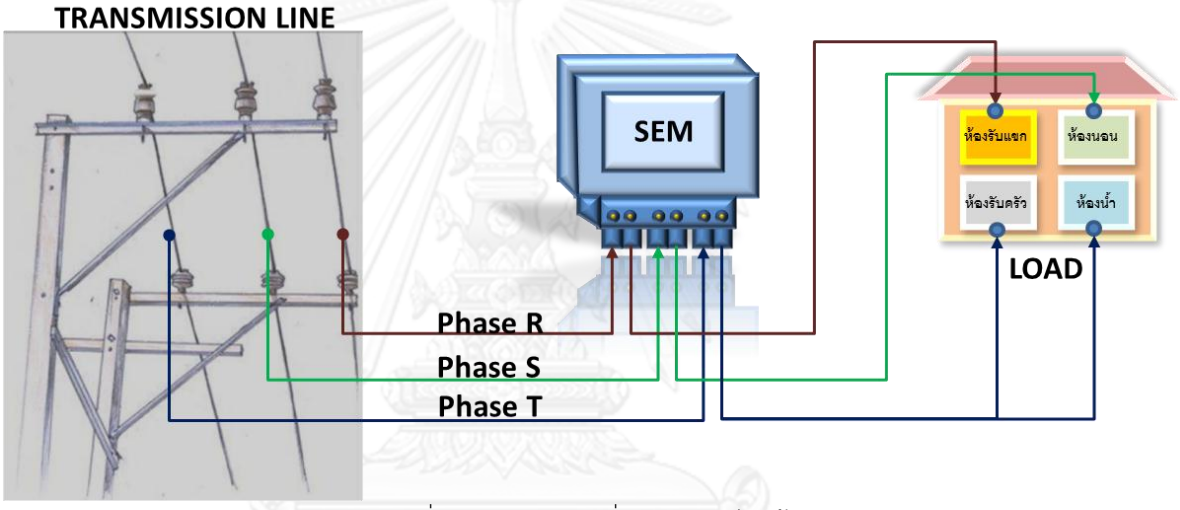
รูปที่ 2—14 Utility Private NANs

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3

การออกแบบฮาร์ดแวร์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการจำลองระบบอ่านมิเตอร์แบบอัตโนมัติโดยใช้ Smart Energy Meter (SEM) จำนวน 2 ตัว ซึ่ง SEM แต่ละตัวประกอบด้วยสองส่วนหลัก คือ ส่วนของอุปกรณ์วัดพลังงานไฟฟ้าดังแสดงการเชื่อมต่อสายไฟเข้าและออกจาก SEM ในรูปที่ 3—1 และส่วนประกอบที่เป็นเครือข่ายการสื่อสารข้อมูลดังรูปที่ 3—2



รูปที่ 3—1 แสดงการเชื่อมต่อมิเตอร์กับบ้าน

หลักการทำงาน AMI

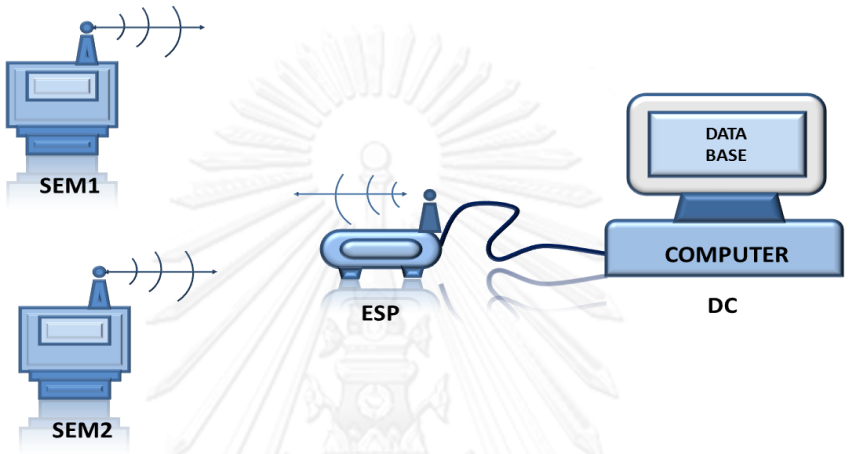
- การทำงานอุปกรณ์วัดพลังงานไฟฟ้า

เริ่มต้นจากการวัดสัญญาณแอนาล็อกของแรงดันไฟฟ้าโดยวงจรแบ่งแรงดัน และวัดสัญญาณแอนาล็อกของกระแสไฟฟ้าโดยใช้ Current Transformer (CT) ซึ่งจะได้สัญญาณแรงดันตามอัตราส่วนรอบของหม้อแปลงกระแส จากนั้นนำสัญญาณแรงดันที่ได้ผ่าน ADC จะได้ข้อมูลดิจิตอลที่ส่งไปคำนวณทางไฟฟ้าต่างๆ ข้อมูลบางส่วนที่คำนวณแล้วจะนำไปแสดงบนจอแอลซีดี และบันทึกลงแฟลชภายใน MCU ทุกๆ 15 นาที และส่งไปยังศูนย์ข้อมูลเพื่อนำมาวิเคราะห์พฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อไป

- การทำงานส่วนที่เป็นเครือข่ายการสื่อสารข้อมูลพลังงานไฟฟ้า

เริ่มต้นจาก Data Center (DC) ส่งคำสั่งตรวจสอบรหัสมิเตอร์ เพื่อสร้างช่องทางการสื่อสารผ่านทางโปรแกรมส่วนต่อประสานกราฟฟิกกับผู้ใช้ (Graphic User Interface: GUI) บนคอมพิวเตอร์

ที่เชื่อมต่อกับตัวประสานกลาง (Coordinator) ในที่นี้จะถูกกำหนดให้เป็น Energy Service Portal (ESP) เป็นการเชื่อมต่อการสื่อสารแบบอนุกรม (Serial Communication Interfaces: SCIs หรือ Com Port) จากนั้น ESP จะส่งคำสั่งตรวจสอบรหัสมิเตอร์ไปยัง SEM เพื่อตรวจสอบรหัสภายในมิเตอร์กับรหัสที่ทาง DC ส่งไปตรงกันหรือไม่ หากตรงกันแล้ว SEM จะโหลดข้อมูลที่ต้องการส่งมาเก็บไว้ที่ ZigBee ของมันเพื่อรอคำสั่งเรียกดูรูปแบบการใช้พลังงาน (Load Profile) ต่อไป



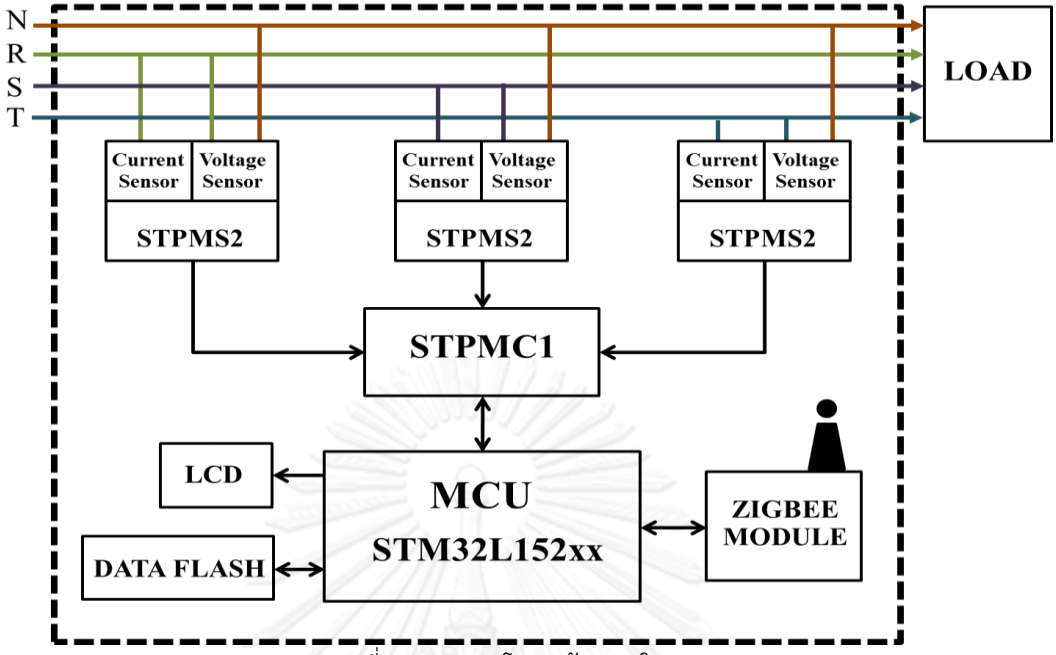
รูปที่ 3—2 แสดงการสื่อสารของระบบอ่านมิเตอร์แบบอัตโนมัติ

หลังจากนั้นผู้ใช้ส่งคำสั่ง Get Profile เพื่อดูข้อมูลการใช้ไฟฟ้า ตัวประสานกลางจะร้องขอข้อมูลด้วยโมดูล ZigBee ผ่านทางคลื่นวิทยุย่านความถี่ 2.4 GHz ไปยังมิเตอร์ที่ติดตั้งโมดูล ZigBee ที่เป็นลูกข่าย (End Device) และโมดูล ZigBee ที่เป็นลูกข่ายนั้นตอบสนองต่อคำสั่งที่ได้รับจากตัวประสานกลาง และส่งข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องการกลับไป เมื่อได้รับข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าครบถ้วน โปรแกรมส่วนต่อประสานกราฟฟิกกับผู้ใช้จะนำข้อมูลที่ได้บันทึกลงบนระบบฐานข้อมูล (System Data Base)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.1. รายละเอียดโครงสร้างของมิเตอร์ไฟฟ้า

มิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าที่ติดตั้งระบบอ่านแบบอัตโนมัตินี้ มีโครงสร้างดังรูป [8]



รูปที่ 3—3 แสดงโครงสร้างภายใน SEM

จากรูปที่ 3—3 ระบบมิเตอร์ทำงานที่กระแสพิกัด 100 แอมแปร์ และแรงดันพิกัด 220 โวลต์ ที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์ ซึ่งใช้ไอซี STPMS2 ทำหน้าที่แปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอล และ STPMC1 ทำหน้าที่คำนวณค่าพลังงานทางไฟฟ้า ส่วนไอซีประมวลผล STM32L152VBT6 ทำหน้าที่บันทึกข้อมูลทางไฟฟ้าลงแฟลชข้อมูล และควบคุมการแสดงผลผ่านหน้าจอแอลซีดี นอกจากนี้ทำหน้าที่ส่งข้อมูลทางไฟฟ้าไปยังโมดูล ZigBee ส่วนโมดูล ZigBee ใช้ไอซี STM32W108CB ที่มีส่วนประมวลผลและตัวขับสัญญาณ RF อยู่ในตัวเดียวกัน โดยที่ STM32W108CB จะถูกโปรแกรมเพื่อสื่อสารตามโพรโตคอลของ ZIgBee

จากโครงสร้างภายใน SEM ข้างต้นซึ่งแสดงอุปกรณ์ทางฮาร์ดแวร์ที่สำคัญ ซึ่งจะแสดงรายละเอียดของไอซีประมวลผล และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ ดังนี้

3.1.1. หน่วยประมวลผลกลาง STM32L152RVB6 [9]

รูปที่ 3—4 STM32L152VBT6

หน่วยประมวลผลกลางที่ใช้เป็นตระกูลของ ARM รุ่น Cortex M3 หมายเลข STM32L152RVB6 ผลิตโดยบริษัท STMicroelectronics มีความเร็วการทำงานสูงสุดที่ 32 MHz เป็นไอซีประหยัดพลังงาน มีโมดูลภายในที่ใช้ติดต่อสื่อสารคือ SPI, UART ส่วนโมดูล TIM ใช้ในการขัดจังหวะเพื่ออ่านค่าต่างๆจากไอซี STPMC1 หน่วยประมวลผลกลางมีหน้าที่หลัก ได้แก่

- ส่วนที่ทำหน้าที่ความคุมการสื่อสารผ่านโมดูล Serial Peripheral Interface Bus (SPI) ใช้สื่อสารกับไอซี STPMC1 การสื่อสารนั้นเป็นการสื่อสารส่งผ่านข้อมูลทั้งส่งและรับผ่านช่องการสื่อสาร Master Output Slave Input (MOSI) ของ SPI หน่วยประมวลผลกลางจะจ่ายสัญญาณนาฬิกาไปยัง STPMC1 สำหรับการติดต่อสื่อสาร
- ควบคุมการคำนวณของไอซี STPMC1 ทำการสั่งให้คำนวณทุกๆ 0.1 วินาที
- ทำหน้าที่คำนวณค่าพื้นฐานต่างๆทางไฟฟ้า เช่น ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (Real Power) ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent Power) ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive Power) ค่ากระแสไฟฟ้าอาร์เอ็มเอส (I_{rms}) ค่าแรงดันไฟฟ้าอาร์เอ็มเอส (V_{rms}) และ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power factor, PF.)
- ทำหน้าที่บันทึกค่าพลังงานแอคทีฟลงในแฟลชข้อมูล
- ขับจอแอลซีดีแสดงผลปริมาณทางไฟฟ้า

3.1.2. ตัวคำนวณพลังงาน STPMC1 [2]

รูปที่ 3—5 STPMC1

เป็นไอซีที่มีฟังชันก์คำนวณปริมาณทางไฟฟ้าหลายชนิดได้พร้อมๆกัน เช่น แรงดัน, กระแส, พลังงานแอคทีฟ และพลังงานรีแอคทีฟ โดยต้องใช้ร่วมกับไอซี STPMS1 หรือ STPMS2 หนึ่งตัวหรือมากกว่า โดยรับข้อมูลที่ได้จากการแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอลมาคำนวณและจัดเก็บภายในรีจิสเตอร์เพื่อรอการอ่านข้อมูลออกโดยหน่วยประมวลผลกลาง นอกจากนี้ STPMC1 ทำหน้าที่จ่ายสัญญาณนาฬิกาให้กับ STPMS1 หรือ STPMS2 เพื่อใช้บอกจังหวะการรับข้อมูลจาก STPMS1 หรือ STPMS2 ผ่านสายสัญญาณอีกเส้นหนึ่ง

พร้อมกันนี้ STPMC1 ยังทำหน้าที่คำนวณค่าทางไฟฟ้าต่างๆเก็บลงในรีจิสเตอร์ภายในเพื่อรอหน่วยประมวลผลกลางมาอ่านข้อมูลออกไป คุณสมบัติของ STPMC1 มีดังต่อไปนี้

- รองรับการใช้งานทั้ง 1, 2 และ 3 เฟส ในระบบการต่อแบบวาย (WYE) และแบบเดลต้า (Delta)
- สามารถคำนวณได้ทั้ง พลังงานไฟฟ้าจริง และ พลังงานไฟฟ้าปรากฏ ค่าแรงดันไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าแบบชั่วขณะและแบบอาร์เอ็มเอส
- ใช้งานได้ทั้ง Rocosky coil, หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า, shunt และHall censor
- สามารถตรวจสอบเพื่อป้องกันการรบกวนจากสนามแม่เหล็กภายนอก (External Magnetic Influence, EMI)
- ติดต่อสื่อสารแบบ SPI
- รองรับมาตรฐาน IEC 62052-11/ 62053-21/ 62053-22/ 62053-23

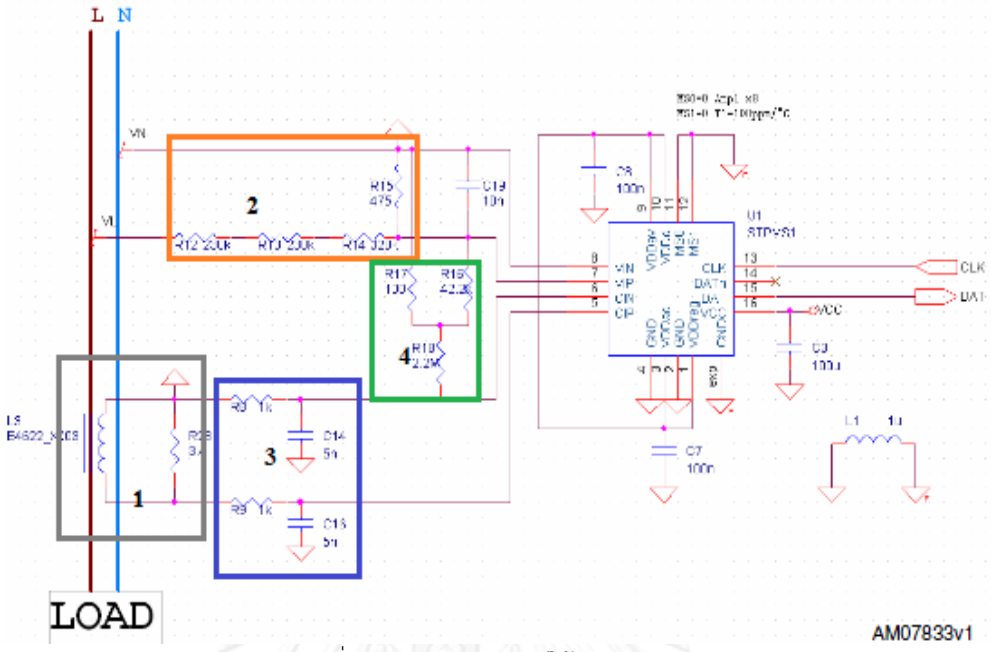
มีขนาดบัฟเฟอร์จำกัด หน่วยประมวลผลกลางต้องอ่านข้อมูลออกอย่างน้อย ครั้ง ต่อ 10 วินาที

3.1.3. **ตัวแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิตอล (Analog to digital converter; ADC) STPMS1 [10]**

รูปที่ 3—6 STPMS1

ตัวแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอลมีความละเอียด บิต 16โดยอ้างอิงกับแรงดันไฟฟ้า (Reference Voltage, V_{REF}) ขนาด 1.23 โวลต์ รับสัญญาณแรงดันขาเข้าสูงสุดระหว่างช่อง VIP และ VIN (Voltage channel+, Voltage channel-) ได้ในช่วง ± 0.3 โวลต์ ส่วนสัญญาณแรงดันขาเข้าสูงสุดระหว่างช่อง CIP และ CIN (Current channel+, Current channel) สามารถปรับเลือกใช้สัญญาณแรงดันขาเข้าสูงสุดได้ด้วยการปรับอัตราการขยาย (gain) เป็น 8 ทำให้รับสัญญาณแรงดันขาเข้าสูงสุดที่ระหว่างช่อง CIP และ CIN ได้ในช่วง ± 0.15 โวลต์ และถ้าปรับอัตราการขยายเป็น 16 ทำให้รับสัญญาณแรงดันขาเข้าสูงสุดระหว่างช่อง CIP และ CIN ได้ในช่วง ± 0.035 โวลต์

STPMS1 ทำหน้าที่แปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอลใช้วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าในการตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟฟ้า และใช้หม้อแปลงกระแสไฟฟ้าที่มี R_b ต่อคร่อมตรวจจับสัญญาณกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 3—7 วงจรประยุกต์ใช้ร่วมกับ STPMS1

จากรูปที่ 3—7 ประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้ [11]

- กรอบ 1 วงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า

STPMS1 มีวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าภายนอกโดยใช้หม้อแปลงกระแสไฟฟ้าที่ความแม่นยำระดับคลาส 0.1% อัตราส่วนขดลวดปฐมภูมิต่อทุติยภูมิ 1: 2500 มีความเป็นเชิงเส้นในช่วง 0-10 แอมป์ ซึ่งความต้านทานเบอร์เด้นที่ใช้มีค่าความต้านทาน 2.2 โอห์ม เพื่อสร้างแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะกับอัตราการขยายที่เลือกไว้คือ อัตราการขยาย 8 ฉะนั้นสัญญาณแรงดันขาเข้าสูงสุดที่ระหว่างช่อง CIN และ CIP ได้ในช่วง ± 0.15 โวลต์

- กรอบ 2 วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า

ใช้วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าใช้ความต้านท้าน 696 กิโลโอห์มต่อลำดับความต้านทาน (in-series resistors) แต่ละตัวมีค่า 232 กิโลโอห์ม เพื่อมั่นใจว่าแรงดันไฟฟ้าสูงชั่วขณะ (voltage transient) ไม่สามารถผ่านความต้านทานได้ และลดความต่างศักดิ์ตกคร่อมความต้านทาน (R2)

จากรูปที่ 3—7 ในกรอบสีส้มแสดงการต่อความต้านทาน R1 มีค่า $R_1+R_2+R_3$ เท่ากับ 696 กิโลโอห์ม และ R2 มีค่า 475 โอห์ม

- กรอบ 3 วงจรป้องกันสัญญาณรบกวน

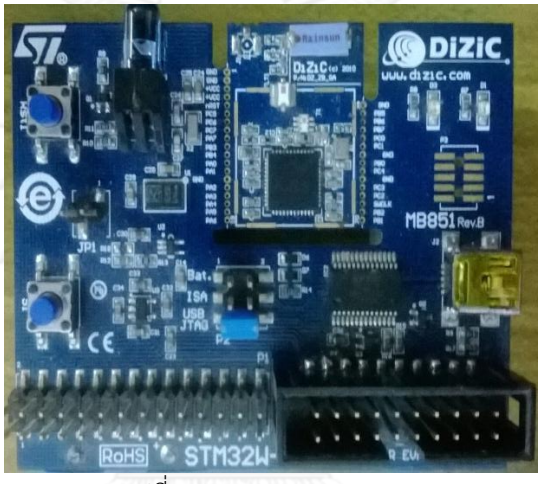
เป็นชนิดกรองความถี่ต่ำ ซึ่งส่งผลเล็กน้อยบนแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมระหว่าง CIN กับ CIP และ VIN กับ VIP เพื่อลดความผิดเพี้ยนของสัญญาณจากการชักสัญญาณ โดยลบความถี่นอกขอบเขต

ของสัญญาณขาเข้าก่อนการชักสัญญาณ ใช้วงจร a resistor-capacitor (RC) แบบ Passive Lowpass Filter ค่าความถี่กรองออกที่ 31.831 kHz ซึ่งสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนที่ -20 dB/dec

- กรอบ 4.ป้องกันสัญญาณแทรกข้าม

ป้องกันสัญญาณแทรกข้ามระหว่างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าและสัญญาณกระแสไฟฟ้าขาเข้าให้ได้สัดส่วนที่เหมาะสม

3.1.4. **โมดูล ZigBee**



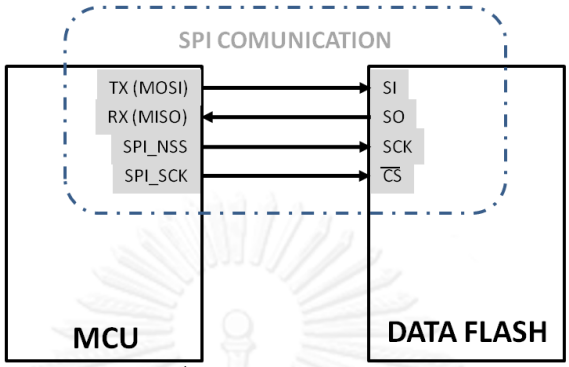
รูปที่ 3—8 Module ZigBee

บอร์ดโมดูล ZigBee ผลิตโดยบริษัท DiZiC ส่วนไอซีหน่วยประมวลผลกลางหมายเลข STM32W108CB ผลิตโดยบริษัท STMicroelectronics ใช้สำหรับส่งคลื่นวิทยุในย่านความถี่ 2.4 GHz สามารถเลือกช่องในการสื่อสารได้ 16 ช่องสัญญาณ (ช่อง 11 – ช่อง 26) ไอซี STM32W108CB เป็นไอซีหน่วยประมวลผลกลางขนาด 32 บิต ในโพรโทคอล ZigBee Stack มีชั้น MAC (Medium Access Control) สามารถรับส่งข้อมูลบนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ในส่วน Smart Energy Profile ที่ประยุกต์ใช้ให้เข้ากับการพัฒนาระบบอ่านมิเตอร์แบบอัตโนมัติ ส่วนนี้อยู่ใน Application level ซึ่งอยู่ในโพรโทคอล ZigBee Stack ผู้พัฒนาสามารถประยุกต์ใช้ในส่วนนี้ โดยการเชื่อมต่อกับตัวมิเตอร์ไฟฟ้าผ่านช่องทาง UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) มีอัตราการรับส่งข้อมูลที่ 11520 กิโลบิตต่อวินาที

3.1.5. **แฟลชข้อมูล (Data Flash)**

แฟลชข้อมูลใช้ไอซีเบอร์ AT45DB161D ของบริษัท ATMEL เป็นแฟลชข้อมูลที่มีขนาด 16 เมกะบิต มีขนาด 528 ไบต์ต่อเพจ และมีเพจทั้งหมด 4095 เพจ มีการติดต่อผ่านทางช่องทาง SPI

(Serial Peripheral Interface) มีอัตราเร็วการอ่านข้อมูลสูงสุดที่ 66 เมกะบิตต่อวินาที (Mbps) มีหน้าที่เก็บข้อมูลพลังงานไฟฟ้าทุกๆ 15 นาที การติดต่อแสดงดังรูปที่ 3—9



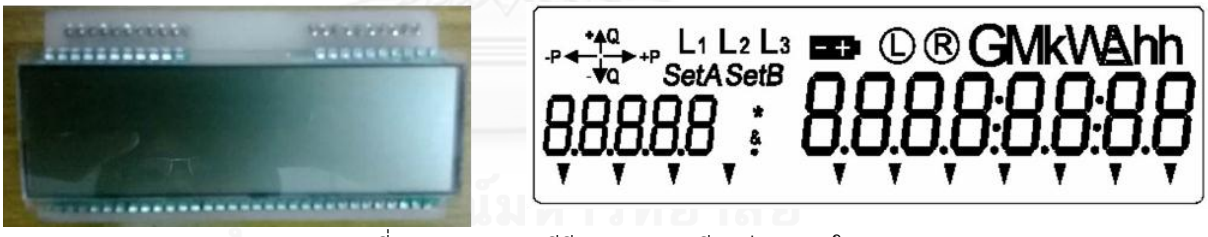
รูปที่ 3—9 แสดงการติดต่อสื่อสารระหว่าง MCU กับ Data Flash ด้วยโมดูล SPI

3.1.6. ส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ

นอกเหนือจากหน่วยประมวลผลกลางและไอซีวัดพลังงานแล้ว ยังมีอุปกรณ์อื่นๆที่ใช้ในมิเตอร์ดังต่อไปนี้

3.1.6.1. จอผลึกเหลว (LCD)

เป็นจอที่ผลิตขึ้นมาเพื่อรองรับกับมิเตอร์ 3 เฟสทำหน้าที่แสดงปริมาณทางไฟฟ้า มีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้



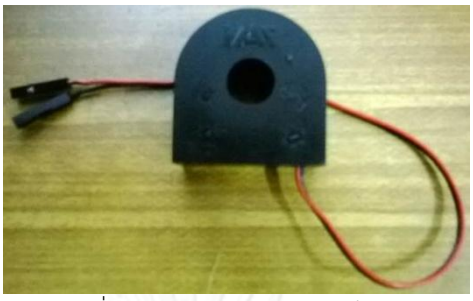
รูปที่ 3—10 จอแอลซีดี และรายละเอียดต่างๆภายในจอ

- ส่วนที่แสดงค่าทางไฟฟ้าต่างๆ เป็นแบบ 7 เซกเม้นต์ มี 8 ตัว ขนาดใหญ่
- ส่วนที่แสดงไลน์ของสายส่ง มีสามไลน์ที่ใช้แสดงคือ L_1, L_2 และ L_3
- ส่วนที่แสดงชื่อรายการทางไฟฟ้าเป็นแบบ 7 เซกเม้นต์ มี 7 ตัว ขนาดเล็ก
- ส่วนที่แสดงหน่วยทางไฟฟ้า
- แสดงทิศทางของกำลังงานไฟฟ้า

โดยใช้ไฟจากไอซีหน่วยประมวลผลกลางใช้จ่ายไฟในการขับแอลซีดีประมาณ โวลต์ 3.0

Chulalongkorn University

3.1.6.2. **หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า (Current Transformer)**



รูปที่ 3—11 หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า

หม้อแปลงกระแสไฟฟ้าที่ติดตั้งสำเร็จรูปมาพร้อมกับชุดกล่องมิเตอร์สำหรับสามเฟส ตัวหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าผลิตโดยบริษัท VAC ที่มีความแม่นยำระดับคลาส 0.1 อัตราส่วนขดลวดปฐมภูมิต่อทุติยภูมิ 1:2500 กระแสไฟฟ้าพิกัดที่ 10 แอมป์ ซึ่งมีความเป็นเชิงเส้นในการวัดในช่วงกระแสไฟฟ้า 0 – 10 แอมป์

3.1.6.3. **วาริสเตอร์**

รูปที่ 3—12 วาริสเตอร์

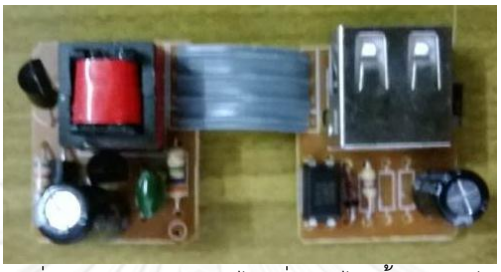
ผลิตโดยบริษัท THINKING ELECTRONIC INDUSTRIAL (TKS) ทำหน้าที่ป้องกันแรงดันเสิร์จ มีช่วงในการทำงานที่ 11 Vac ~ 680 Vac นอกจากนี้ยังป้องกันกระแสเสิร์จในช่วง 100 A ~ 6500 A และมีการป้องกันกระแสไฟฟ้ารั่วที่เกิดจากเสิร์จไปยังอุปกรณ์ได้ดี

3.1.6.4. **Electric Double Layer Capacitors**

รูปที่ 3—13 คาปาซิเตอร์

ผลิตโดยบริษัท PANASONIC เป็นคาปาซิเตอร์ที่มีขนาดประมาณ 1.18 - 0.8ฟารัดต์ ทำหน้าที่จ่ายไฟเลี้ยงให้กับ RTC โมดูล เพื่อให้โมดูล Real Time Clock (RTC) สามารถทำงานต่อไปได้ชั่วระยะเวลาหนึ่ง สามารถจ่ายหรือชาร์จแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุดที่ โวลต์ 5.5

3.1.6.5. **แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า**

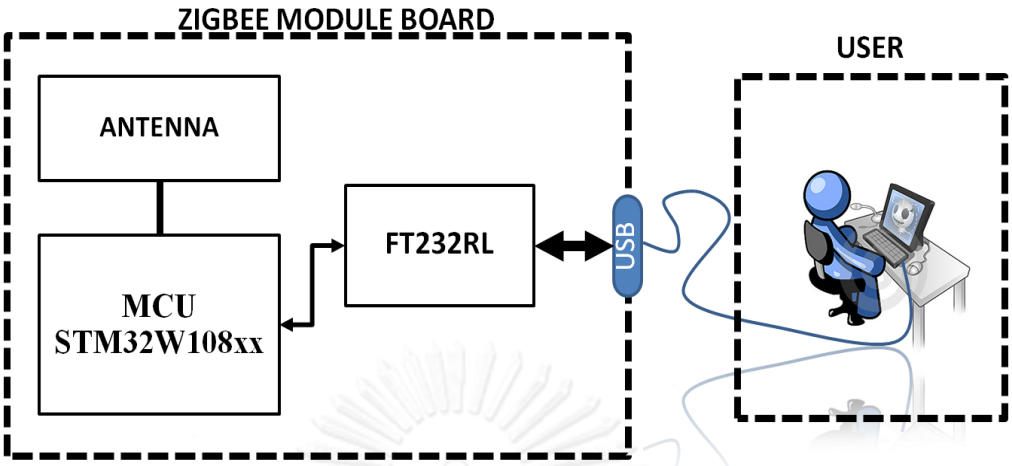


รูปที่ 3—14 แหล่งแปลงไฟเพื่อจ่ายไฟเลี้ยงมิเตอร์

เป็นแบบ Switching power supply ที่ใช้ชาร์จแบตเตอรี่มือถือทั่วไป สามารถรับแรงดันไฟฟ้าขาเข้าที่ 240-100Vac ที่ความถี่ 60/50Hz และแปลงแรงดันไฟฟ้าขาออกที่ 5Vdc สามารถจ่ายพิกัดกระแสไฟฟ้าได้ได้ที่ แอมป์ 1 ทำหน้าที่เลี้ยงไฟให้กับมิเตอร์ทั่งระบบ และใช้วงจรเรียงกระแสไฟฟ้า (Voltage Regulator) เบอร์ LM1117MPX-3.3 สำหรับปรับระดับแรงดันไฟฟ้าให้พอดีที่จะจ่ายให้กับ MCU คือ โวลต์ 3.3

3.2. รายละเอียดโครงสร้างของตัวประสานกลาง

ตัวประสานกลางใช้บอร์ดสำเร็จรูปที่มีโมดูล ZigBee ของบริษัท DiZiC ทำหน้าที่เชื่อมต่อกับ DC ผ่านทางกราฟิกผู้ใช้(Graphic User Interface: GUI) บนคอมพิวเตอร์ ผ่านตัวประสานการสื่อสารแบบอนุกรม (Serial Communication Interfaces: SCIs หรือ Com Port) และสื่อสารข้อมูลผ่านทางโมดูล ZigBee ซึ่งในชั้น Application ของโพรโทคอล ZigBee Stack มี ZigBee Smart Energy Profile ใช้สำหรับจัดการข้อมูลที่เป็นพลังงานอัจฉริยะของระบบเครือข่ายการสื่อสาร ตัวประสานกลางมีโครงสร้างดังรูป

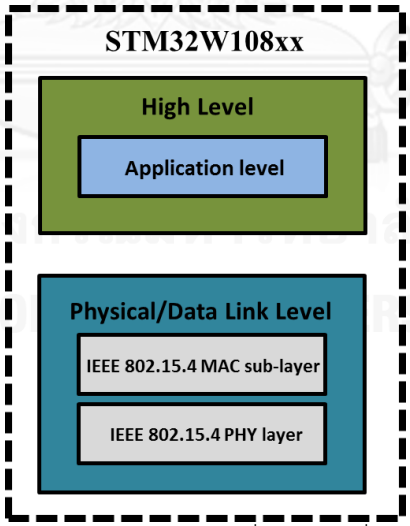


รูปที่ 3—15 โครงสร้างในส่วนของตัวประสานกลาง

ส่วนประกอบทางทางฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในตัวประสานกลางมีดังต่อไปนี้

3.2.1. ตัวประมวลผลโพรโตคอล ZigBee STM32W108xx

เป็นไอซีประมวลผลทำหน้าที่เป็นตัวสื่อสารวิทยุที่ความถี่ 24 GHz ภายในไอซีประมวลผลประกอบด้วยโมเดลการสื่อสารวิทยุตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 และส่วนที่เป็นชั้นประยุกต์ใช้งาน (Application Layer) ดังรูป



รูปที่ 3—16 ชั้นประยุกต์ใช้งานและโปรโตคอลของโครงสื่อสารวิทยุทั่วไปตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4

จากรูปที่ 3—16 การโปรแกรมเฟิร์มแวร์นั้นทำการโปรแกรมในส่วนของชั้นประยุกต์ใช้งาน (Application level) การควบคุมสื่อสารที่ใช้ Smart Energy Profile

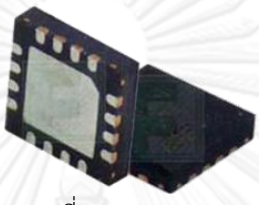
3.2.2. บล็อก ANTENNA

อุปกรณ์สำหรับรับและส่งคลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency)

3.2.3. FT232RL

เป็นไอซีที่สามารถทำให้หน่วยประมวลผลสามารถเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ต USB

3.3. ฮาร์ดแวร์ที่เปลี่ยนใหม่

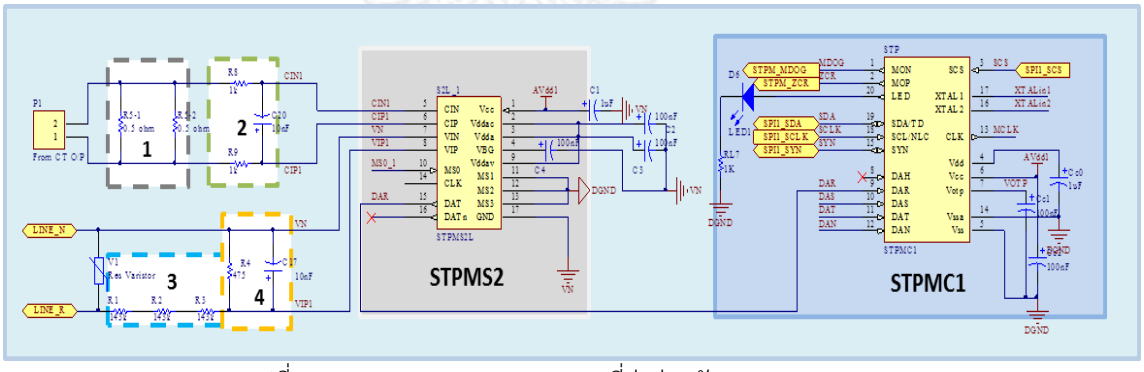


รูปที่ 3—17 STPMS2

3.3.1. STPMS2 [12]

ทำหน้าที่แปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอลแบบ Two second-order sigma-delta (ΣΔ) Modulators และมีความแม่นยำมากกว่า STPMS1

จากรูปที่ 3—18 ตามลายวงจร STPMS สามารถแบ่งเป็นสองส่วนย่อยได้ดังนี้



รูปที่ 3—18 ลายวงจรของ STPMS2 ที่ต่อร่วมกับ STPMC1

- ในกรอบ 1 วงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า

STPMS2 คล้ายกับ STPMS1 แตกต่างที่ความต้านทานเบอร์เด้นที่ใช้มีค่าความต้านทาน 0.5 โอห์มต่อขนานกันมีค่าเป็น 0.25 โอห์ม เพื่อสร้างแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมกับอัตราการขยายที่เลือกไว้ คือ 16 ฉะนั้นสัญญาณขาเข้าสูงสุดที่ระหว่างช่อง CIN และ CIP ได้ในช่วง ± 0.0375 โวลต์

- ในกรอบ 3 วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า

คล้ายกับ STPMS1 ใช้วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าใช้ตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าใช้ความต้านทาน 143 กิโลโอห์ม ต่อแบบลำดับสามตัว (in-series resistors) เพื่อให้มั่นใจว่าแรงดันไฟฟ้าสูงชั่วขณะ (voltage transient) ไม่สามารถผ่านความต้านทานได้ และลดความต่างศักดิ์ตกคร่อมความต้านทาน R2

จากรูปที่ 3—18 ในกรอบเลข 3 แสดงการต่อความต้านทานดังนี้

R1 มีค่า R_1+R_2+R_3 เท่ากับ 429 กิโลโอห์ม

R2 มีค่า 475 โอห์ม และสามารถรับแรงดันไฟฟ้าได้ในช่วง ± โวลต์ 0.3

- ในกรอบ 2, 4 วงจรป้องกันสัญญาณรบกวนคล้ายกับ STPMS1

จากรูปที่ 3—18 เป็นลายวงจรที่ต่อทำงานร่วมกันระหว่าง STPMC1 กับ STPMS2 โดย STPMS1 ส่งข้อมูลทั้งกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่คำนวณได้ให้กับ STPMC1 เพื่อนำไปคำนวณและส่งไปยังหน่วยประมวลผลกลางต่อไป

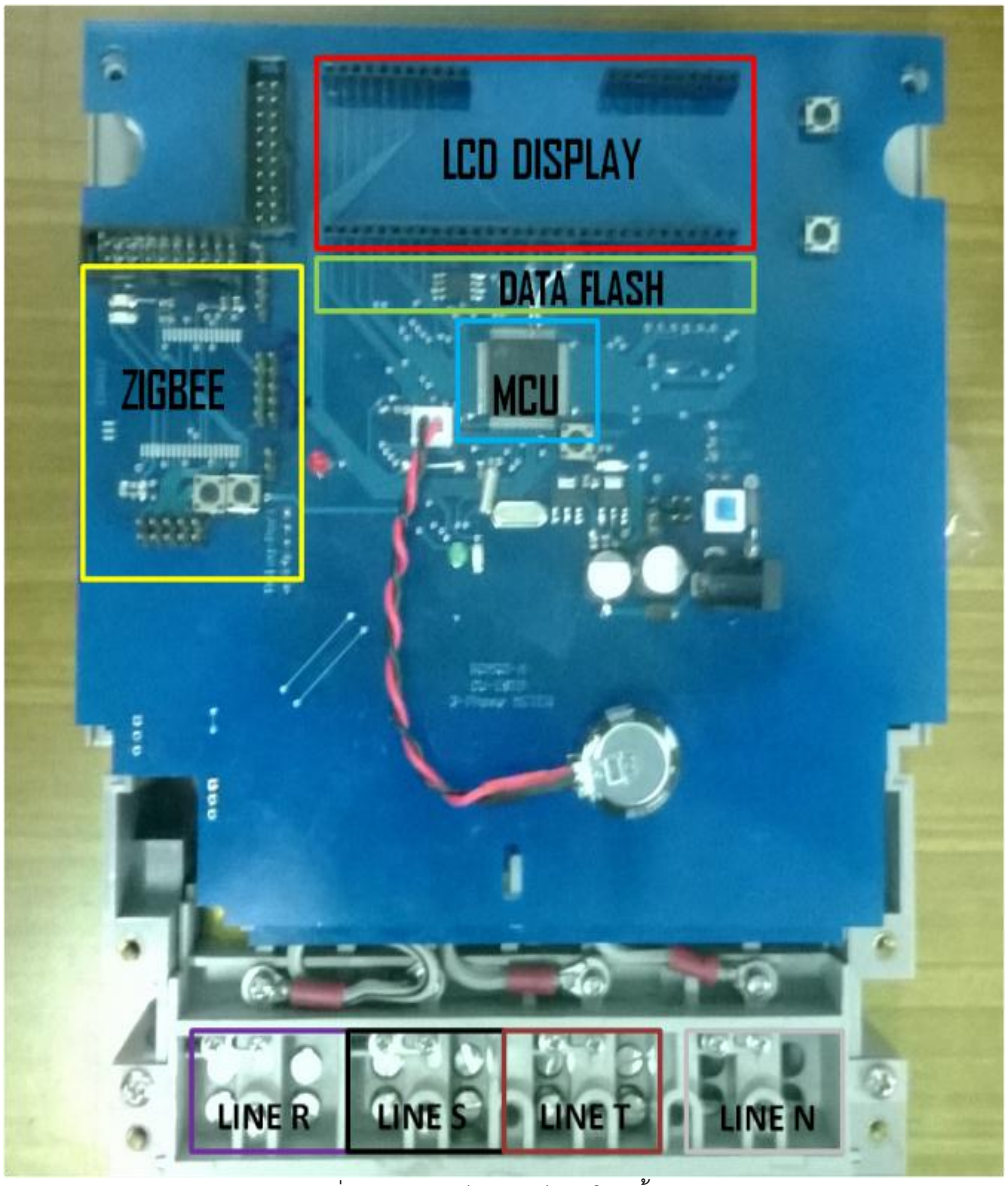
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.4. ฮาร์ดแวร์ที่พัฒนาขึ้น

ฮาร์ดแวร์ที่พัฒนาขึ้นนั้นจะแสดงส่วนที่เป็นมิเตอร์แบบเก่าและมิเตอร์ที่ทำขึ้นแบบใหม่

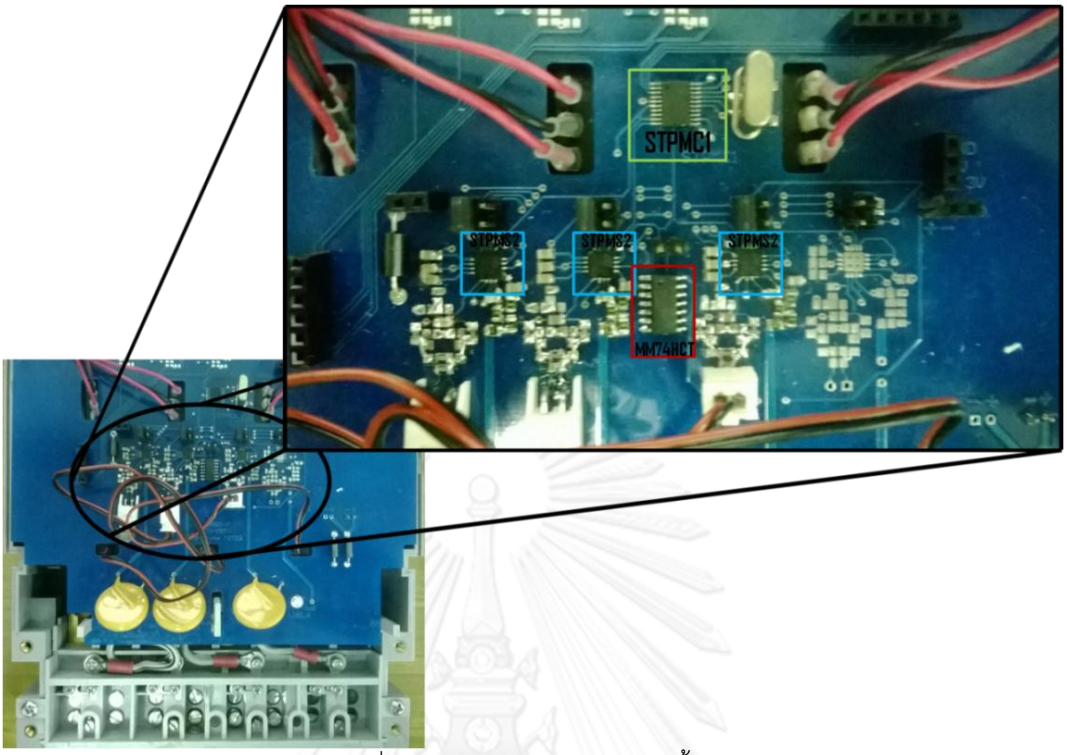
3.4.1. ฮาร์ดแวร์ที่พัฒนาขึ้นแบบใหม่ มี 2 เลเยอร์ดังนี้

- เลเยอร์บน



รูปที่ 3—19 บอร์ดมิเตอร์แบบใหม่ชั้นบน

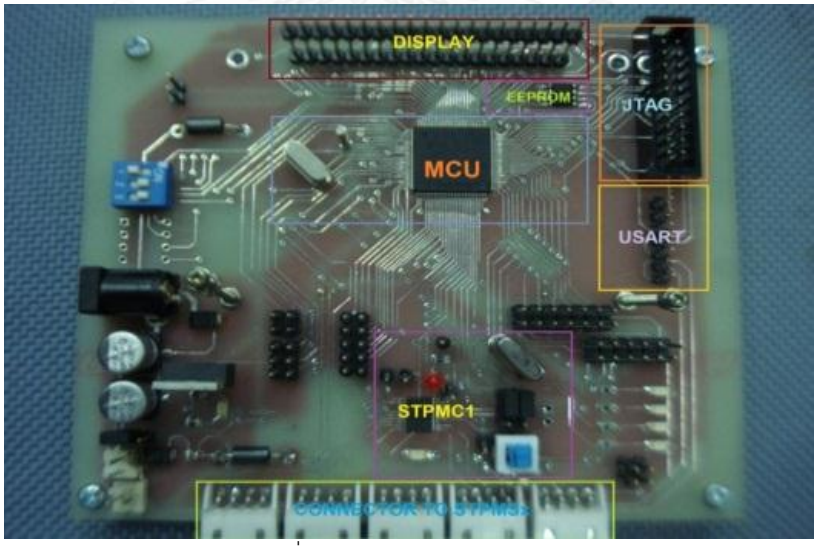
- เลเยอร์ล่าง



รูปที่ 3—20 บอร์ดมิเตอร์แบบใหม่ชั้นล่าง

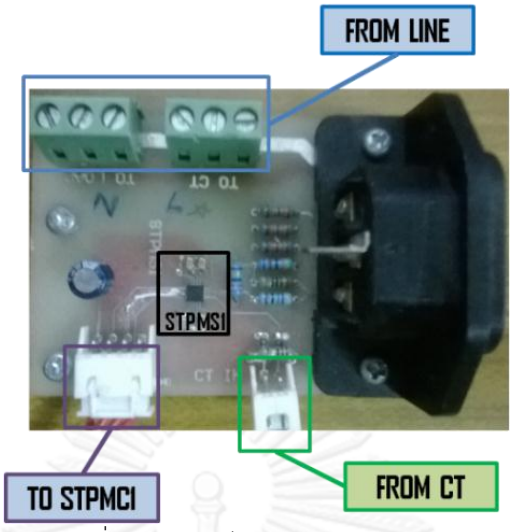
3.4.2. ฮาร์ดแวร์ที่พัฒนาขึ้นแบบเก่า

- บอร์ดมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า



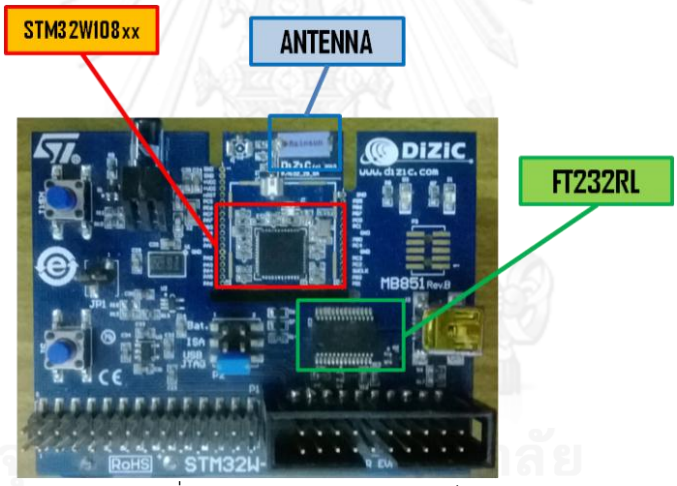
รูปที่ 3—21 บอร์ดมิเตอร์แบบเก่า

- บอร์ด STPMS1



รูปที่ 3—22 บอร์ด STPMS1 แบบเก่า

- บอร์ด ZigBee Module สำเร็จรูป



รูปที่ 3—23 บอร์ด ZigBee สำเร็จรูป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

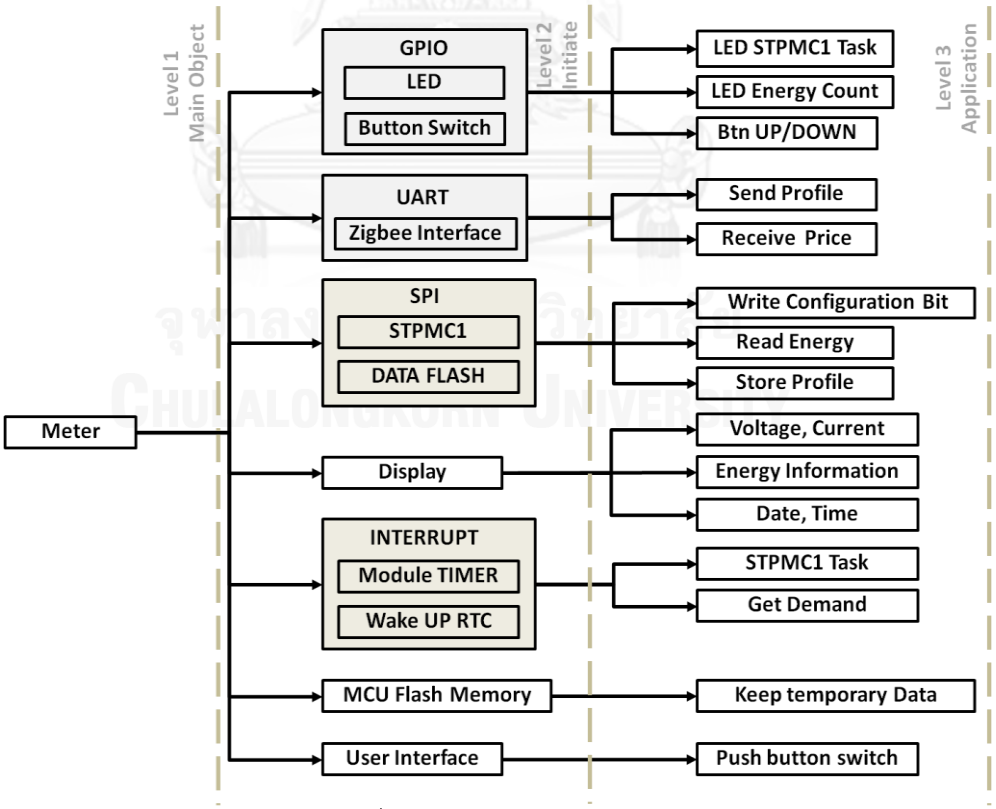
บทที่ 4

รายละเอียดเฟิร์มแวร์

เฟิร์มแวร์ที่พัฒนาขึ้นบนเครือข่ายสื่อสารของ Smart Energy Meter (SEM) มีอยู่สามส่วน ประกอบด้วย เฟิร์มแวร์ควบคุม SEM, เฟิร์มแวร์ควบคุม Energy Service Portal (ESP) และเฟิร์มแวร์ควบคุม Data Center (DC)

4.1. เฟิร์มแวร์ควบคุม SEM

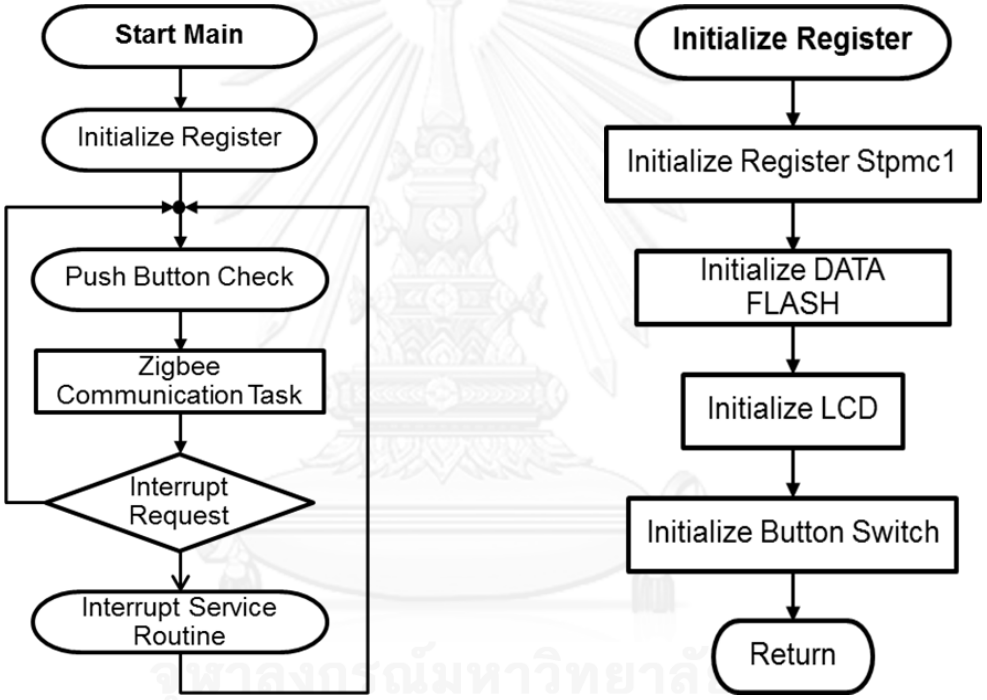
ใช้ภาษาซีในการพัฒนาผ่านโปรแกรม IAR Embedded Workbench for ARM รุ่น 6.306 มีหน้าที่ควบคุมการทำงานของจอแอลซีดี, บันทึกข้อมูลทางพลังงานไฟฟ้าลงหน่วยความจำแบบแฟลช , คำนวณหาค่าทางไฟฟ้า, ความคุมการติดต่อสื่อสารต่างๆ เช่น การติดต่อกับไอซี STPMC1, โมดูล ZigBee และหน่วยความจำแบบแฟลช AT45DB161D รวมถึงการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ในระบบ Advance Metering Infrastructure (AMI) ซึ่งมีโครงสร้างทางซอฟต์แวร์ดังแสดงในรูปที่ 4—1



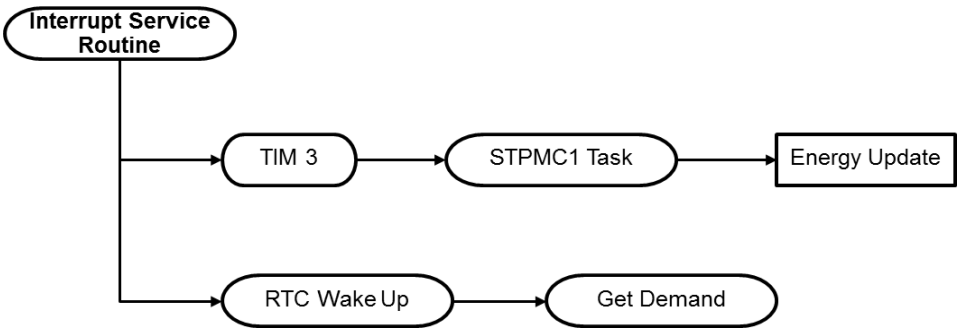
รูปที่ 4—1 โครงสร้างเฟิร์มแวร์บน SEM

4.1.1. โปรแกรมเริ่มต้นการทำงาน

ทำหน้าที่กำหนดค่าเริ่มต้นของรีจิสเตอร์ (Register) ที่ควบคุมช่องสื่อสารต่างๆ เช่น GPIO, UART และ SPI ที่อยู่ภายในหน่วยประมวลผลกลาง เพื่อจะได้ควบคุมการทำงานของจอแอลซีดี, ปุ่มกด และไอซีต่อพ่วงอื่นๆ เช่น STPMC1 และDATA FLASH รูปที่ 4—2 ด้านขวา เมื่อกำหนดค่าเริ่มต้นของช่องสื่อสารแล้ว จึงจะสามารถสื่อสารและกำหนดค่าเริ่มต้นของไอซี STPMC1, Data Flash ผ่านช่องสื่อสาร SPI จากรูปที่ 4—2 ด้านซ้าย มีการตรวจสอบปุ่มกด, ควบคุมการสื่อสารกับโมดูล ZigBee และเข้าสู่โหมดขัดจังหวะเมื่อมีสัญญาณขัดจังหวะเกิดขึ้นเพื่อเข้าสู่รอบการทำงานของการขัดจังหวะต่อไป รอบของการทำงานของระบบแสดงในรูปที่ 4—2 ด้านซ้าย



รูปที่ 4—2 ซ้ายการทำงานทั้งหมดของระบบ SEM ขวาการทำงานกำหนดค่ารีจิสเตอร์เริ่มต้นให้กับช่องสื่อสาร



รูปที่ 4—3 ระบบการทำงานเมื่อเกิดการขัดจังหวะ

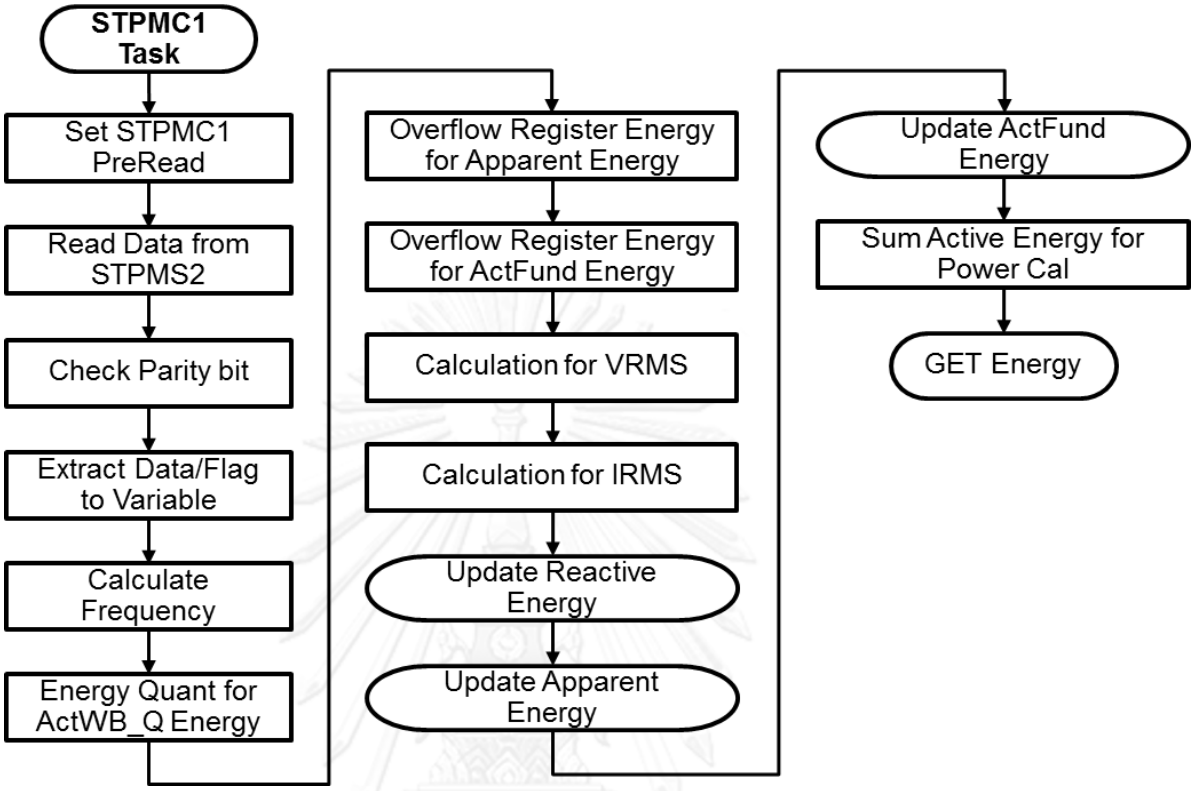
จากรูปที่ 4—2 ด้านซ้าย โปรแกรมการขัดจังหวะใช้ TIM3 ในการสร้างสัญญาณขัดจังหวะเพื่อควบคุมการทำงานของไอซี STPMC1 ทำงานทุกๆ 0.00625 วินาที การทำงานนี้มีทั้งหมด 15 ลำดับงานใช้เวลาทั้งสิ้น 0.09375 วินาที ส่วนการควบคุมการเก็บข้อมูลของโหลดโปรไฟล์นั้นใช้ RTC ในโหมด Wake Up โดยทำการขัดจังหวะทุกๆ 15 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4—3

4.1.2. **โปรแกรมการจัดการไอซี STPMC1**

โปรแกรมแบ่งการทำงานเป็น 15 กระบวนการ โดยเกิดการทำงานหนึ่งกระบวนการจากการขัดจังหวะหนึ่งครั้งมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1). เซ็ตกระบวนการอ่านของไอซี STPMC1
2). อ่านข้อมูลภายในรีจิสเตอร์ของไอซี STPMC1
3). ตรวจสอบด้วย Parity bit เพื่อแน่ใจว่าข้อมูลที่รับมานั้นเป็นข้อมูลที่ถูกต้อง
4). ตรวจสอบสถานะของข้อมูลที่รับมา
5). คำนวณความถี่
6). ตรวจสอบข้อมูลในรีจีสเตอร์ Reactive ภายในไอซี STPMC1 เต็มแล้วหรือไม่
7). ตรวจสอบข้อมูลในรีจีสเตอร์ Active Wideband ภายในไอซี STPMC1 เต็มแล้วหรือไม่
8). ตรวจสอบข้อมูลในรีจีสเตอร์ Active Fundamental ภายในไอซี STPMC1 เต็มแล้วหรือไม่
9). รวมข้อมูลของแรงดันก่อนทำการหาค่าเฉลี่ย
10). รวมข้อมูลของกระแสก่อนทำการหาค่าเฉลี่ย
11). ตรวจสอบค่าพลังงานที่เก็บในบัฟเฟอร์เกินลิมิตแล้วหรือไม่ ถ้าเกินให้เพิ่มค่าของตัวแปร e->ing ที่ละหนึ่ง โดยลำดับการทำงาน 12, 13, 14 มีการทำงานที่เหมือนกัน
12). ส่วน Get Energy เป็นการตรวจสอบว่า รอบการทำงานทั้ง 15 กระบวนการ ครบสิบครั้งแล้วหรือยัง ถ้าครบแล้วให้นำค่าพลังงานต่างๆนำไปใช้ต่อไป

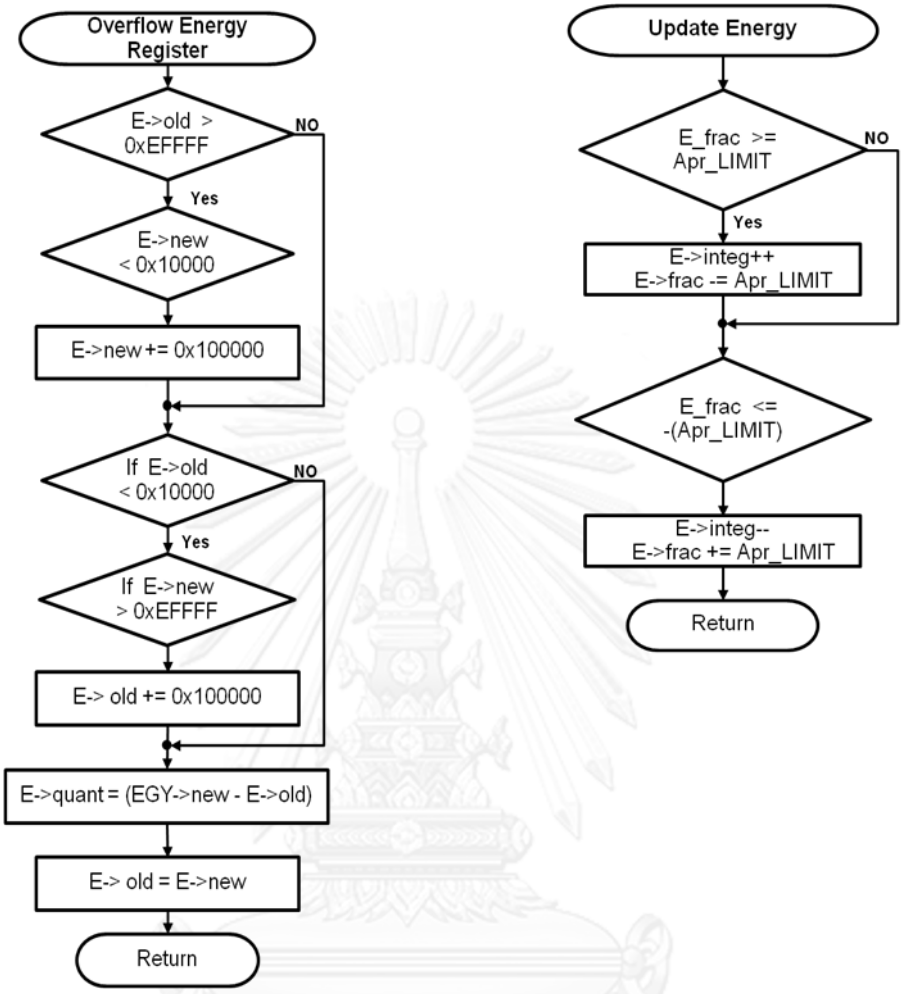
ขั้นตอนการทำงานทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 4—4



รูปที่ 4—4 ระบบการทำงานของไอซี STPMSC1 ทั้ง 15 โหมด

4.1.3. โปรแกรมตรวจสอบข้อมูลภายในรีจิสเตอร์เกินและโปรแกรมอัพเดทปริมาณพลังงาน

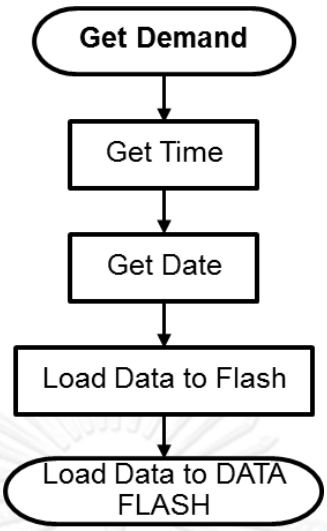
จากรูปที่ 4—5 ด้านซ้าย ลิมิตของจำนวนบิตในรีจิสเตอร์มีค่าเป็น 0xFFFFF โดยตรวจสอบค่าพลังงานที่ได้รับในแต่ละรอบคือ E->new – E->old จากเงื่อนไขแรกของการตรวจสอบ ถ้า E->old มีค่ามากกว่า 0xEFFFF และ E->new ที่อ่านได้มีค่าน้อยกว่าค่า E->old ให้เพิ่มค่า 0x100000 ให้กับ E->new อีกเงื่อนไขเป็นการตรวจสอบค่าพลังงานที่อ่านได้ติดลบหรือไม่ โดยตรวจสอบเงื่อนไข E->old มีค่าน้อยกว่า 0x10000 หรือไม่ และ E->new > 0xEFFFF ให้บวกค่า 0x100000 ให้กับ E->old ค่าที่ได้จาก E->new – E->old จะมีค่าติดลบ ส่วนรูปที่ 4—5 ด้านขวาเป็นการทอนส่วนพลังงานที่เกินค่าลิมิตที่ตั้งค่าไว้ถ้าค่า E->frac มีค่าเกินลิมิตให้ลบค่าพลังงานนั้นด้วยค่าพลังงานลิมิตแล้วเพิ่มค่า E->integ ที่ละหนึ่ง



รูปที่ 4—5 ซ้ายโปรแกรมตรวจสอบข้อมูลเกินภายในรีจิสเตอร์ ขวาโปรแกรมอัฟเดทข้อมูล

4.1.4. **โปรแกรมควบคุมความต้องการทางพลังงาน**

กระบวนการนี้เป็นการควบคุมความต้องการพลังงานจะทำงานก็ต่อเมื่อเกิดสัญญาณขัดจังหวะของโมดูล RTC ในโหมด Wake UP โดยถูกสั่งให้ทำงานทุกๆ 15 นาที ค่าต่างๆที่ได้มีดังนี้คือ เวลา, วัน, และค่าพลังงาน ซึ่งจะพักเก็บไว้ที่แฟลชของหน่วยประมวลผลกลางก่อน เมื่อบัฟเฟอร์เต็มตามที่กำหนดจะถูกโหลดเก็บที่แฟลชข้อมูลต่อไป มีลำดับการทำงานดังรูปที่ 4—6

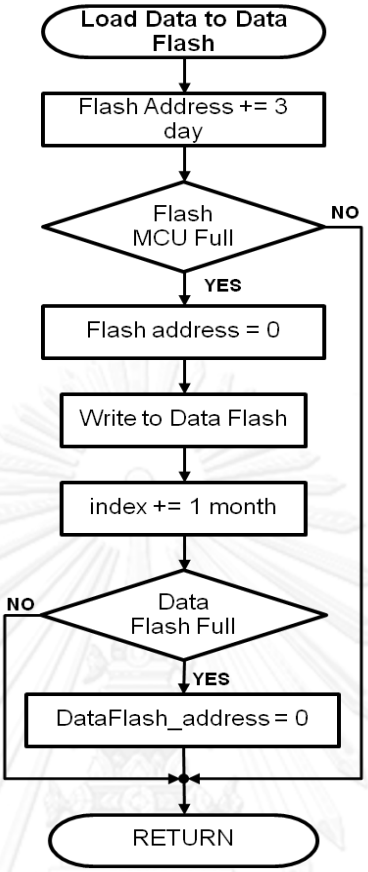


รูปที่ 4—6 โปรแกรมควบคุมความต้องการปริมาณทางไฟฟ้า

4.1.4.1. **กระบวนการการบันทึกข้อมูลลงแฟลชข้อมูล (Data Flash)**

ก่อนที่จะมีการบันทึกข้อมูลลงแฟลชข้อมูล เพื่อความแน่ใจว่าที่พักข้อมูลนั้นจะไม่มีการสูญหายเมื่อเกิดไฟดับ จึงทำการเก็บข้อมูลไว้ที่แฟลชในหน่วยประมวลผลกลางก่อน ช่วยลดการใช้งานแฟลชข้อมูลและช่วยยืดระยะการใช้งานของแฟลชข้อมูล ซึ่งหน่วยประมวลผลกลางมีหน่วยความจำแฟลชอยู่ระหว่าง 0x08080000 - 0x08080FFF มีขนาด 4096 ไบต์ แต่ใช้เก็บข้อมูลช่วง 0x08080000 - 0x08080D ซึ่งเก็บข้อมูลทุกๆ 8015 นาทีได้เป็นเวลา 3 วัน รูปแบบข้อมูลมีขนาด 12 ไบต์ ประกอบด้วย ตัวบ่งชี้ 1 ไบต์ เวลา 3 ไบต์ วัน 4 ไบต์ พลังงาน 4 ไบต์ ซึ่งหนึ่งวันจะใช้ 12x4x24 เท่ากับ 1152 ไบต์ ฉะนั้น 3 วันใช้ 1152x3 เท่ากับ 3456 ไบต์ มีค่าเท่ากับ D80

กระบวนการทำงานเริ่มตั้งแต่ตรวจสอบข้อมูลที่บันทึกลงแฟลช ถ้าขนาดข้อมูลน้อยกว่า 3456 ไบต์ให้ข้ามการบันทึกลงแฟลชข้อมูล แต่ถ้าขนาดข้อมูลเท่ากับ 3456 ไบต์ให้บันทึกข้อมูลทั้งหมดลงแฟลชข้อมูล และเปลี่ยนตัวชี้ไปเลขที่อยู่ 0x08080000 เมื่อบันทึกถึงเลขที่อยู่คือ 0x08080D ให้ทำการบันทึกข้อมูลลงแฟลชข้อมูลอีกทอดหนึ่ง เมื่อแฟลชข้อมูลเต็ม 80(ในที่นี้เก็บนาน 1 เดือน) จะทำการเลื่อนตัวบ่งชี้ไปไว้เลขที่อยู่ตำแหน่ง 0x00000 ของเฟลชข้อมูลต่อไป แผนผังการทำงานแสดงดังรูป

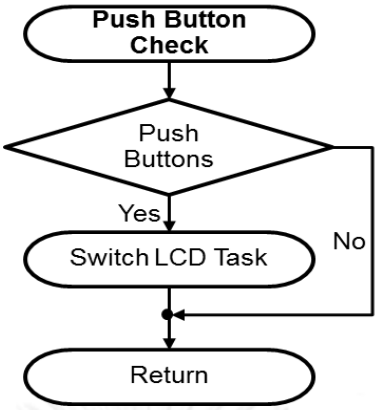


รูปที่ 4—7 โปรแกรมควบคุมกระบวนการเก็บข้อมูลลงแฟลช

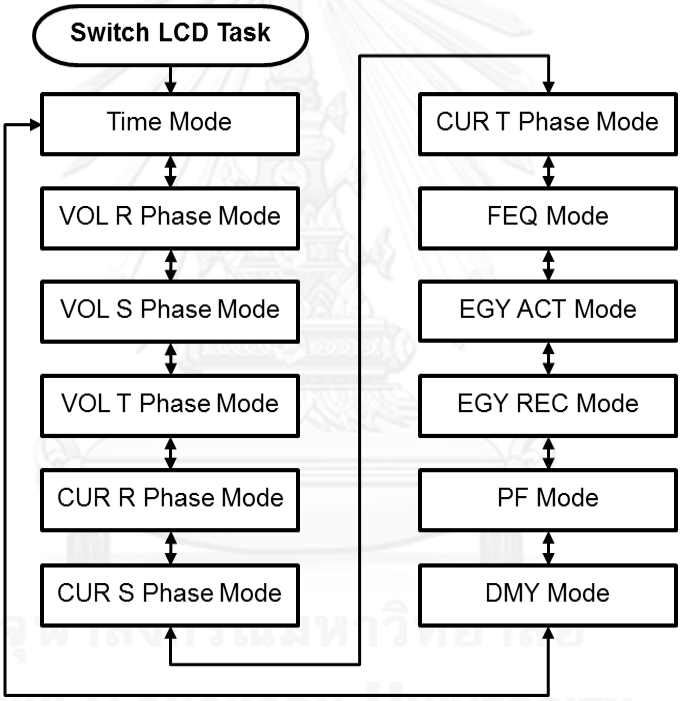
4.1.5. โปรแกรมแสดงข้อมูลผ่านจอแอลซีดี

ส่วนนี้เป็นกระบวนการแสดงข้อมูลผ่านจอแอลซีดีมีกระบวนการทำงานดังรูปที่ 4—8 การตรวจสอบปุ่มกดถ้าเกิดการกดจะเข้าสู่โหมดการแสดงข้อมูลต่างๆผ่านจอแอลซีดีโดยค่าเริ่มต้นจะแสดงค่าเวลา ปุ่มกดมีสองปุ่มไว้ตรวจสอบการกดนับเพิ่ม และกดนับถอยหลัง ค่าที่แสดงออกจอแอลซีดีแสดงรูปที่ 4—9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4—8 โปรแกรมตรวจสอบปุ่มกด



รูปที่ 4—9 โปรแกรมแสดงข้อมูลผ่านจอแอลซีดี

4.1.6. โปรแกรมชุดคำสั่งสื่อสารในชั้นประยุกต์

ในการติดต่อสื่อสารใช้รูปแบบการติดต่อสื่อสารแบบดาว และแบบต้นไม้ ซึ่งการโปรแกรมมิเตอร์ไฟฟ้าแต่ละตัวจะถูกกำหนดให้เป็น SEM ซึ่ง SEM แต่ล่ะตัวจะมีเลขที่อยู่ (Short Address) ที่ใช้ติดต่อกันภายในเครือข่าย (ในกรณีส่งแบบ UNICAST) โดยเลขที่อยู่ถูกกำหนดโดยตัวประสานกลาง (Coordinator) โดยโมดูล ZigBee ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสานกลางถูกกำหนดให้เป็น ESP มีเลขที่อยู่

เป็น 0x0000 เสมอ ซึ่ง ESP จะเป็นตัวกำหนด Short Address ให้เมื่อมี SEM เข้าร่วมเครือข่าย ในการติดต่อสื่อสารได้ทั้งแบบ UNICAST และ BOARDCAST

ระบบการสื่อสารของโมดูล ZigBee ใช้เฟิร์มแวร์สำเร็จรูปของทาง Ember รุ่น EmberZNet 4.3.0 เพื่อควบคุมการทำงานโพรโตคอล ZigBee ในการสื่อสารโดยใส่ APS Frame ที่จะส่งลงรีจิสเตอร์ที่รองรับ APS Frame ปลายทางซึ่ง APS Frame ประกอบด้วยส่วนสำคัญคือ ProfileId และ Cluster โดย ProfileId กำหนดเป็น 0x0109 เพราะเป็นไปตามรูปแบบของ Smart Energy Profile ส่วนคลัสเตอร์มีหลายคลัสเตอร์แต่ที่นำมาใช้ได้แก่ Simple Metering cluster, Price cluster เป็นต้น

4.1.6.1. **รูปแบบของกลุ่มข้อมูลที่ใช้สื่อสารในชั้นประยุกต์**

คำสั่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ คำสั่งทั่วไป และคำสั่งเฉพาะเจาะจง

4.1.6.1.1. คำสั่งทั่วไป (General Command) [4]

ข้อมูลที่ใช้ส่งในชั้นประยุกต์ใช้คำสั่งดังต่อไปนี้คือ คำสั่งเขียนข้อมูลทั่วไป และคำสั่งอ่านข้อมูลทั่วไป

- คำสั่งเขียนข้อมูลทั่วไป

เป็นรูปแบบของกลุ่มข้อมูลที่ ESP ส่งเพื่อสั่งให้ SEM ทำการเขียนข้อมูลลงใน Attribute Id

Last General Frame Control	Last General Message Sequence Number	General command Id	Cluster Id	Attribute Id	Data Type	Data
1 Byte	1 Byte	1 Byte	2 Byte	2 Byte	1 Byte	Depend on data type

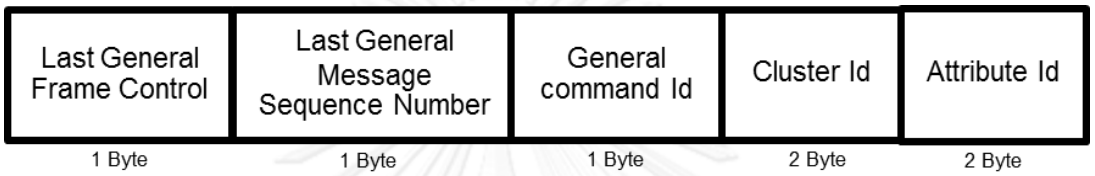
รูปที่ 4—10 เฟรมข้อมูลสำหรับคำสั่งเขียน

- Last Frame Control เป็นฟิลด์ที่บ่งบอกว่าข้อมูลที่ส่งเป็นประเภทไหนระหว่าง ZCL PROFILE WIDE COMMAND และ ZCL CLUSTER SPECIFIC COMMAND
- Last Message Sequence Number เป็นไบต์ที่บ่งบอกลำดับเฟรมข้อมูลที่ส่งเป็นลำดับที่เท่าไรโดยทำการนับลำดับเฟรมข้อมูลที่ส่งไปเรื่อยๆ
- General Command Id เป็นไบต์ที่บ่งบอกว่าคำสั่งทั่วไปนั้นเป็นคำสั่งทั่วไปประเภทไหนระหว่างคำสั่ง ZCL READ ATTRIBUTES COMMAND ID และคำสั่งZCL WRITE ATTRIBUTES COMMAND โดย General Command Id ในที่นี้ต้องใช้ Id ของรูปแบบคำสั่ง ZCL WRITE ATTRIBUTES COMMAND ID
- Cluster Id บ่งบอกว่าจะทำการเขียนข้อมูลลงคลัสเตอร์ประเภทไหน
- Attribute Id บ่งบอกว่าจะทำการเขียนข้อมูลลงแอตทริบิวต์ไหนของคลัสเตอร์นั้นๆ

- Data Type ชนิดของมูลที่ใช้เขียนลงแอตทริบิวต์ เช่น 8, 16, 32-bit data, Boolean, UCT Time, Time of day, Date เป็นต้น
- Data ข้อมูลที่จะทำการเขียนลงในแอตทริบิวต์ ค่าที่จะเขียนต้องสัมพันธ์กับ Data Type

➢ คำสั่งอ่านข้อมูลทั่วไป

เป็นรูปแบบของกลุ่มข้อมูลที่ ESP ส่งเพื่อสั่งให้ SEM ทำการอ่านข้อมูลออกจาก Attribute Id



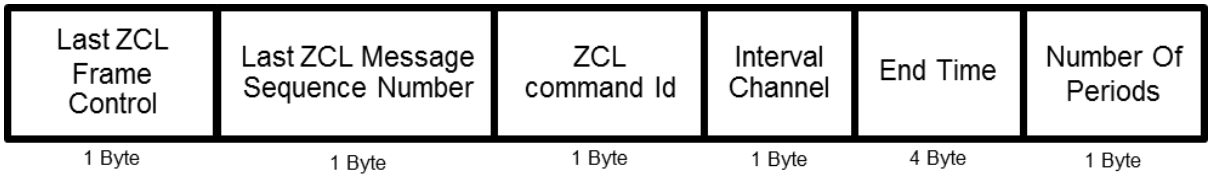
รูปที่ 4—11 เฟรมข้อมูลสำหรับคำสั่งอ่าน

- Last Frame Control เป็นฟิลด์ที่บ่งบอกว่าข้อมูลที่ส่งเป็นประเภทไหนระหว่าง ZCL PROFILE WIDE COMMAND และ ZCL CLUSTER SPECIFIC COMMAND
- Last Message Sequence Number เป็นไบต์ที่บ่งบอกลำดับเฟรมข้อมูลที่ส่งเป็นลำดับที่เท่าไรโดยจะทำการนับลำดับเฟรมข้อมูลที่ส่งไปเรื่อยๆ
- General Command Id เป็นไบต์ที่บ่งบอกว่าคำสั่งทั่วไปนั้นเป็นคำสั่งทั่วไปประเภทไหนระหว่างคำสั่ง ZCL READ ATTRIBUTES COMMAND ID และ คำสั่งZCL WRITE ATTRIBUTES COMMAND ID โดย General Command Id ในที่นี้ต้องใช้ Id ของรูปแบบคำสั่ง ZCL READ ATTRIBUTES COMMAND ID ตามเฟรมข้อมูลข้างต้น
- Cluster Id บ่งบอกว่าจะทำการอ่านข้อมูลออกจากคลัสเตอร์ประเภทไหน
- Attribute Id บ่งบอกว่าจะทำการอ่านข้อมูลออกจากแอตทริบิวต์ไหนของคลัสเตอร์นั้นๆ

4.1.6.1.2. **คำสั่งเฉพาะเจาะจง (Specific Command)** [4, 5]

การรับส่งข้อมูลแต่ละครั้งจำเป็นจะต้องมีคำสั่งร้องขอของ ESP หรือ SEM จากฝั่ง Client และมีการตอบสนองคำสั่งจากฝั่ง Server ของ SEM หรือ ESP เสมอ คำสั่งที่ใช้คือ Get Profile ของคลัสเตอร์ Simple Metering

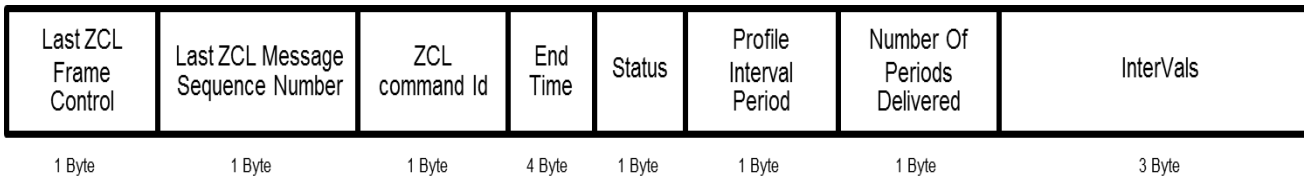
Get Profile [5] เป็นคำสั่งที่สร้างขึ้นเมื่อฝั่ง Client ของ ESP ร้องขอข้อมูล Load Profile จากฝั่ง Server ของ SEM โดยมีรูปแบบการส่งคำสั่งดัง รูปที่ 4—12



รูปที่ 4—12 เฟรมข้อมูลสำหรับเรียกดูโปรไฟต์

- Last ZCL Frame Control เป็นไบต์ที่บ่งบอกเฟรมข้อมูลที่ส่งมานั้นเป็นทางฝั่งไหนส่งระหว่าง server หรือ client
- Last ZCL Message Sequence Number เป็นไบต์ที่บ่งบอกลำดับเฟรมข้อมูลที่ส่งเป็นลำดับที่เท่าไรโดยทำการนับลำดับเฟรมข้อมูลที่ส่งไปเรื่อยๆ
- ZCL Command Id เป็นไบต์ที่บ่งบอกว่าคำสั่งพิเศษนั้นเป็นคำสั่งพิเศษอะไร เช่น Simple Metering Cluster หรือ Price Cluster หรือคลัสเตอร์อื่นๆ
- Interval Channel เป็นค่าที่ใช้เลือกปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่สนใจ ซึ่งตอบสนองกลับโดย Get Profile Response Command
- End Time เวลาสิ้นสุดของช่วงเวลาในการวัดค่าปริมาณทางไฟฟ้า
- Number Of Periods เป็นค่าที่ใช้แทนจำนวนของ intervals ที่ถูกร้องขอ ค่านี้ต้องไม่เกินขนาดที่กำหนดซึ่งเป็นค่าที่กำหนดในเฟิร์มแวร์โปรแกรมสำเร็จรูป หาก interval ที่ถูกร้องขอมากกว่าค่าที่กำหนดในเฟิร์มแวร์ ทำให้คำสั่ง GetProfileResponse ส่งกลับจำนวนของ interval เท่ากับค่าสูงสุดที่กำหนดในเฟิร์มแวร์

กลุ่มคำสั่งตอบสนองของ Get Profile ทางฝั่ง Server ของ SEM ที่ใช้ส่งเพื่อตอบสนองต่อคำสั่ง Get Profile ทางฝั่ง Client ของESP [5]



รูปที่ 4—13 เฟรมข้อมูลสำหรับตอบสนองคำสั่งโปรไฟต์

- Last ZCL Frame Control เป็นไบต์ที่บ่งบอกเฟรมข้อมูลที่ส่งมานั้นเป็นทางฝั่งไหนส่ง คือ ระหว่าง server หรือ client

- Last ZCL Message Sequence Number เป็นไบต์ที่บ่งบอกลำดับเฟรมข้อมูลที่ส่งเป็นลำดับที่เท่าไรโดยจะทำการนับลำดับเฟรมข้อมูลที่ส่งไปเรื่อยๆ
- ZCL Command Id เป็นไบต์ที่บ่งบอกว่าคำสั่งพิเศษนั้นเป็นคำสั่งพิเศษอะไร เช่น Simple Metering Cluster หรือ Price Cluster หรือคลัสเตอร์อื่นๆ
- End Time เวลาสิ้นสุดของช่วงเวลาในการวัดค่าปริมาณทางไฟฟ้า
- Status ตาราง 4—1 แสดงรายการค่าที่ถูกต้องส่งกลับมาในสถานะต่างๆ ดังนี้

ตาราง 4—1 บิตที่แสดงถึงค่าของช่อง Status [5]

ค่า	รายละเอียด
0x00	Success
0x01	Undefined Interval Channel requested
0x02	Interval Channel not supported
0x03	Invalid End Time
0x04	More Periods Requested than can be returned
0x05	No intervals available for the requested time

- ProfileIntervalPeriod ใช้แสดงระยะเวลาที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณทางไฟฟ้า มีค่าต่างๆในตารางดังนี้

ตาราง 4—2 บิตที่แสดงถึงค่าของระยะเวลาของโหลดโปรไฟต์ [5]

Enumerated Value	Time Frame
0	Daily
1	60 minutes
2	30 minutes
3	15 minutes
4	10 minutes
5	7.5 minutes
6	5 minutes
7	2.5 minutes

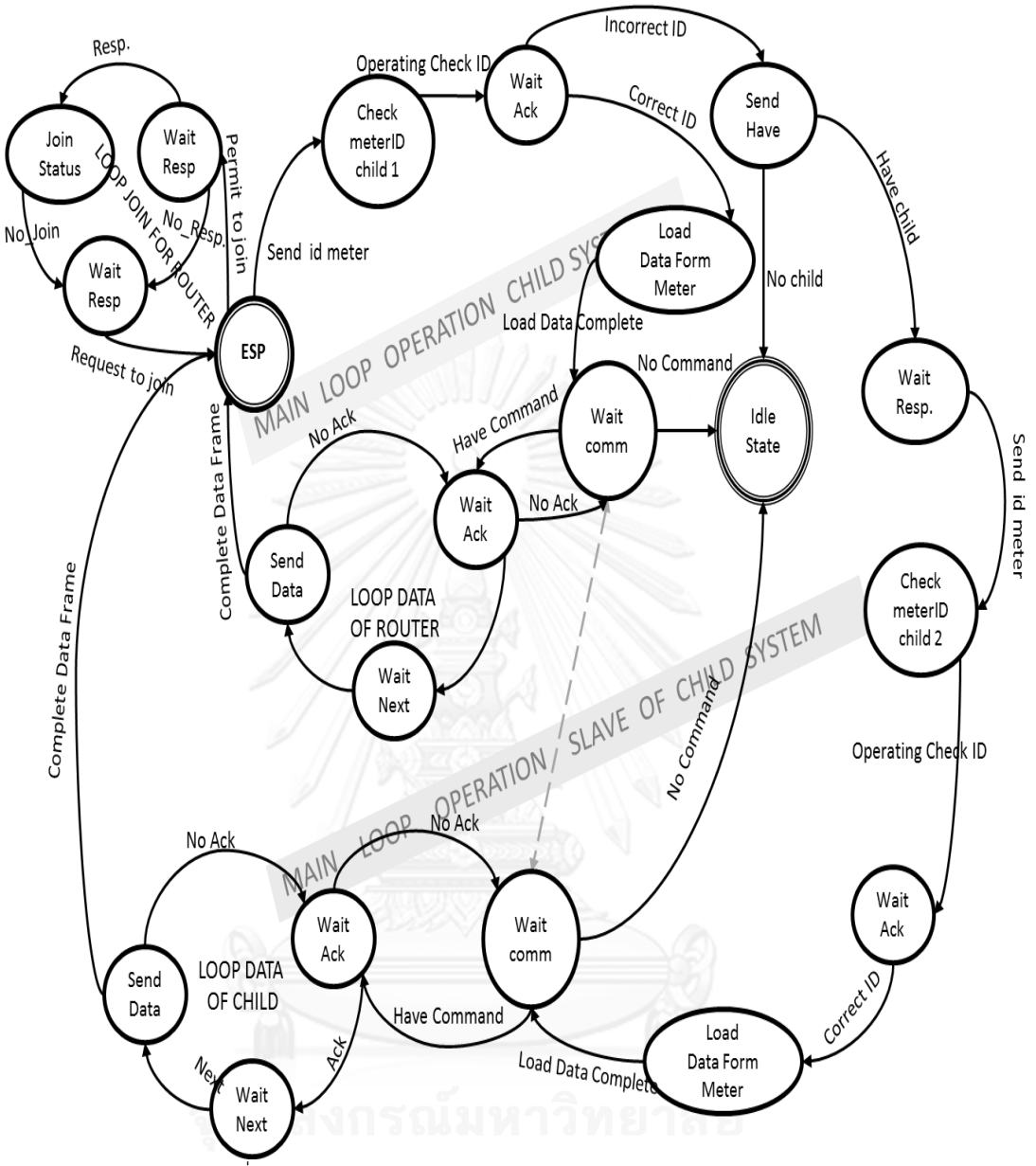
- Number Of Periods Delivered เป็นค่าที่ใช้แทนจำนวนของ intervals ที่ตอบสนองต่อคำสั่ง Get Profile ค่านี้ต้องไม่เกินขนาดที่กำหนดไว้ใน Max Number Of Periods Delivered attribute

- InterVals ชุดของข้อมูลในช่วงเวลาที่ทำการตรวจวัดข้อมูล โดยช่วงเวลาถูกกำหนดด้วยขอบเขตของ ProfileIntervalPeriod

4.1.7. **โปรแกรมควบคุมการทำงานของโพรโตคอล ZigBee**

เป็นการควบคุมการดำเนินงานของการบวนการต่างๆ ในการส่งข้อมูลภายในเครือข่ายระบบอ่านค่ามิเตอร์แบบอัตโนมัติ โดยควบคุมลำดับการทำงานของโพรโตคอล รูปแบบการทำงานเป็นแบบแผนผังด้านล่าง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

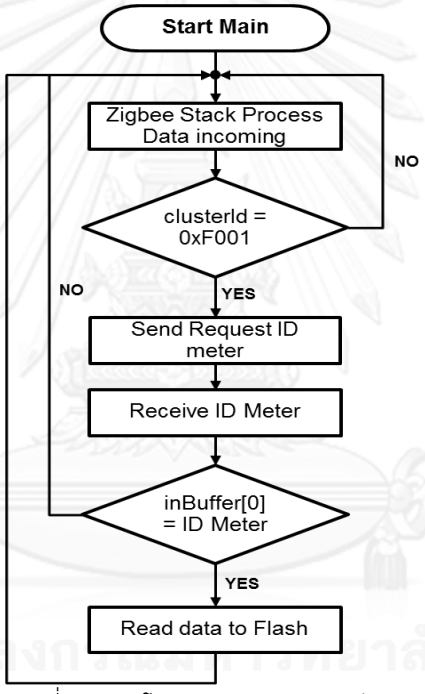


รูปที่ 4—14 แผนผัง ASM ควมคุมการทำงานของโพรโตคอล ZigBee

เป็นกระบวนการทำงานของเครือข่ายระบบอ่านค่ามิเตอร์แบบอัตโนมัติ เริ่มต้นจาก ESP สร้างเครือข่าย โดย SEM ตอบสนองโดยเข้าร่วมเครือข่ายและตอบสนองเพื่อให้ ESP รับรู้เพื่อกำหนดที่อยู่ (Short Address) ให้ เริ่มกระบวนการที่ ESP ส่งรหัสมิเตอร์มายัง SEM โดยตรวจสอบรหัสจาก ESP ที่ส่งมาตรงกับรหัสจาก SEM หรือไม่ ถ้ารหัสตรงกันให้โหลดข้อมูลจากมิเตอร์มาเก็บไว้ที่โมดูล ZigBee ของมันเองแล้วรอ (Idle State) คำสั่ง Get Profile จาก ESP เมื่อตอบสนองต่อคำสั่งก็ทำการส่งข้อมูลการใช้พลังงานกลับไปยัง ESP ต่อไป ซึ่งลูปเล็กด้านในเป็นกระบวนการติดต่อระหว่าง SEM1 กับ ESP ส่วนลูปใหญ่ด้านนอกเป็นกระบวนการติดต่อระหว่าง SEM2 กับ ESP ตามกระบวนการที่ได้อธิบายข้างต้น [13]

4.1.7.1. **โปรแกรมควบคุมการรับส่งข้อมูลภายในโปรโตคอล ZigBee**

กระบวนการทำงานทั้งหมดของโพรโตคอล ZigBee ควบคุมโดยโปรแกรมสำเร็จรูปที่ทาง Ember เป็นผู้สร้างและพัฒนาโปรแกรมให้สามารถรองรับกับระบบ ZigBee Smart Energy Profile นอกจากนี้ยังเพิ่มโปรแกรมในส่วนทำหน้าที่จัดการข้อมูลรับส่งจากตัวมิเตอร์ โดยมีรูปแบบการจัดการดังรูปที่ 4—15 เริ่มต้นด้วยการตรวจสอบข้อมูลที่ส่งมาจาก SEP โดยทำการตรวจสอบรหัสคลัสเตอร์ (Cluster Id) มีค่าตรงกับ 0xF001 หรือไม่ ถ้าตรงตัวโมดูล ZigBee จะส่งคำร้องขอดูรหัส SEM และรับรหัสผ่านพอร์ตอนุกรม จากนั้นตรวจสอบรหัสที่ส่งมากับรหัสจาก SEM ตรงกันหรือไม่ ถ้าตรงให้โหลดข้อมูลจาก SEM เก็บไว้ที่โมดูล ZigBee เพื่อรอคำสั่ง Get Profile ต่อไป



รูปที่ 4—15 โปรแกรมตรวจสอบรหัสมิเตอร์

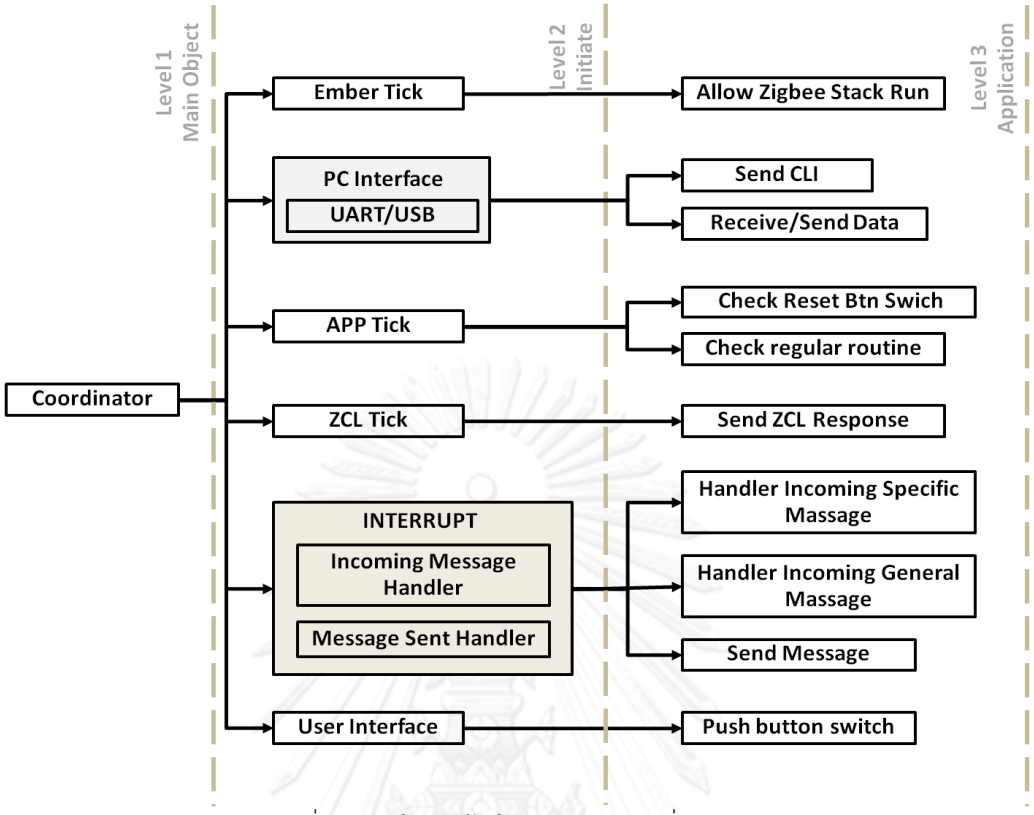
4.2. โปรแกรมควบคุม ESP

เป็นศูนย์กลางจัดการข้อมูลการใช้พลังงานจาก SEM ภายในเครือขาย และส่งข้อมูลที่ได้จากเครือข่ายนั้นเข้าสู่ Data Center (DC) ผ่านช่องทางข้อมูลอนุกรม (Serial Port)

4.2.1. **โครงสร้างการทำงานของโปรแกรมควบคุม ESP**

โครงสร้างนี้ประกอบด้วยสองส่วนสำคัญ คือโปรแกรมควบคุมการทำงานโพรโตคอล ZigBee และโปรแกรมติดต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านทางโมดู UART มีโครงสร้างดังรูป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

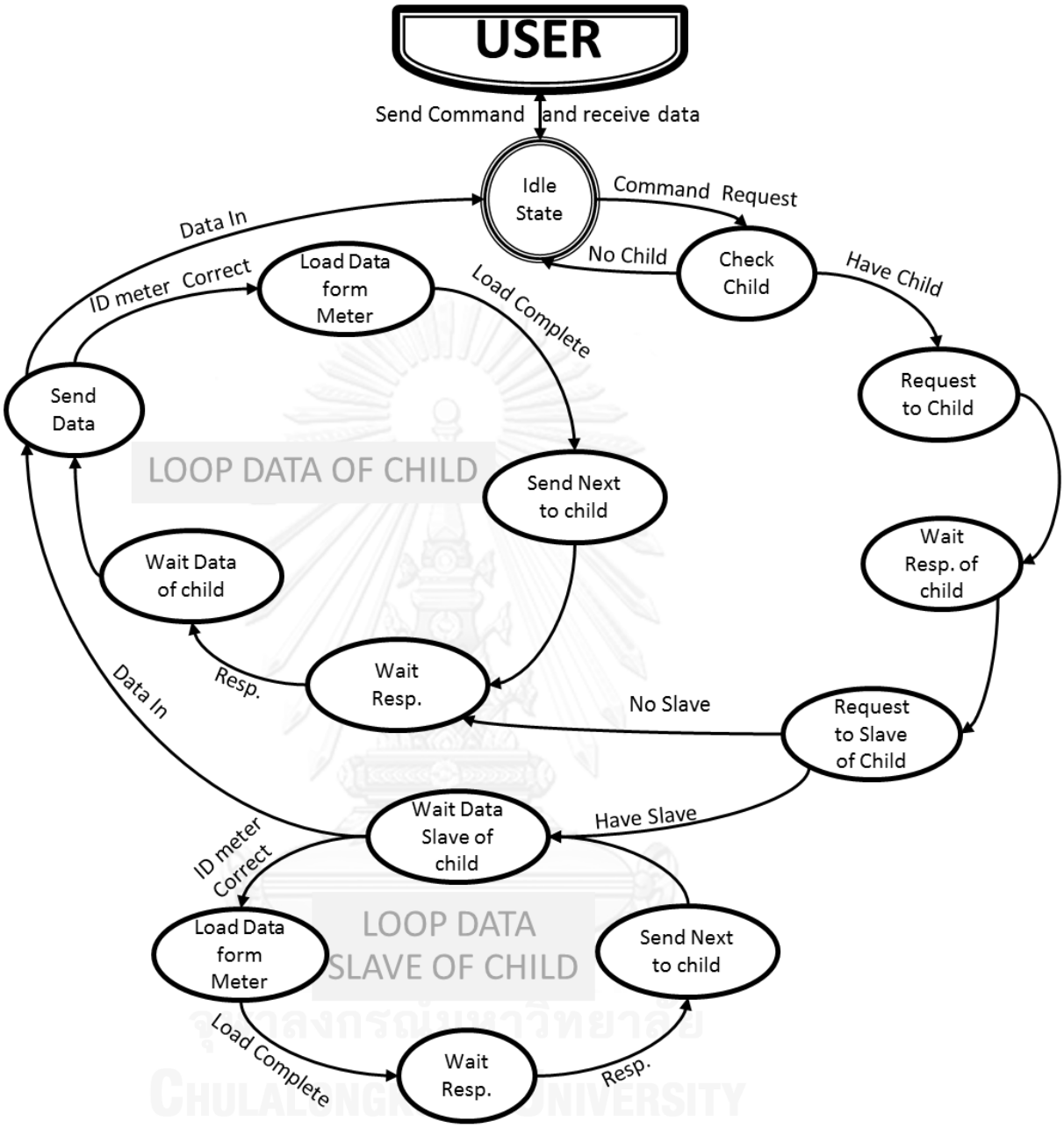


รูปที่ 4—16 โครงสร้างโปรแกรมควบคุมผั่งตัวประสาน

4.2.2. โปรแกรมควบคุมการทำงานสำหรับโพรโตคอล ZigBee

โปรแกรมควบคุมการทำงานโพรโตคอล ZigBee ของ ESP มีการทำงานที่คล้ายกับโปรแกรมควบคุมการทำงานโพรโตคอล ZigBee บน SEM ต่างกันที่หน้าที่การควบคุมคลัสเตอร์ที่มีมากกว่าและหลากหลายประเภทกว่า นอกจากนี้ทำหน้าที่ตอบสนองต่อคำสั่งจาก DC และการจัดการข้อมูลที่เข้ามาจาก SEM ได้หลายๆ ตัวได้แสดงแผนผังการทำงานดังต่อไปนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

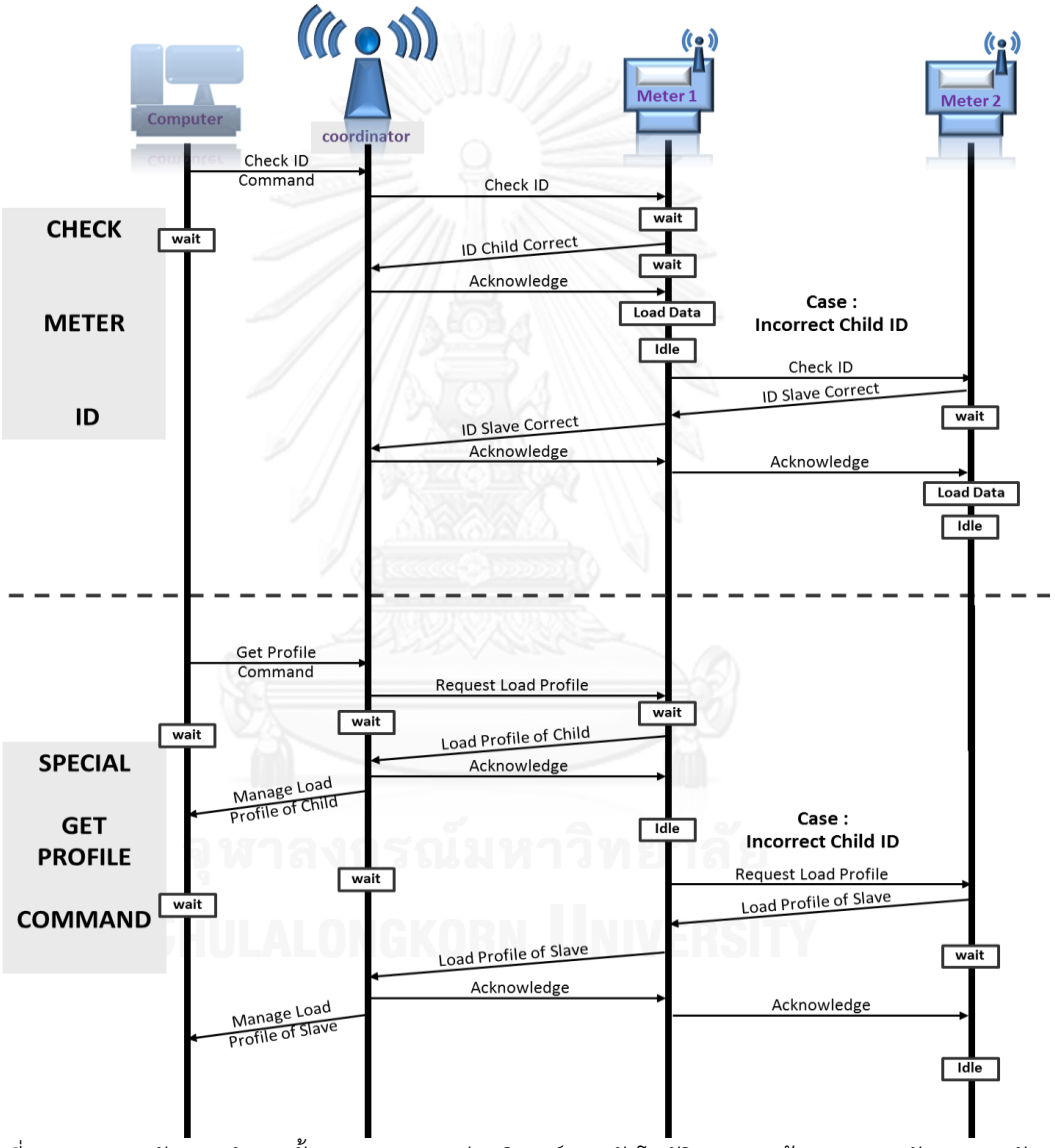


รูปที่ 4—17 โครงสร้างโปรแกรมควบคุมตัว ESP

จากรูปที่ 4—17 เป็นระบบการติดต่อสื่อสารระหว่าง ESP กับ SEM สองตัว โดยตอบสนองต่อการตรวจสอบรหัส SEM1 ว่าถูกต้องหรือไม่ ก่อนที่ SEM1 จะทำการส่งข้อมูลไปยัง ESP ซึ่ง ESP จะทำการส่งข้อมูลไปที่ DC ผ่านช่องทางอนุกรม (Serial Port) ต่อไป ในกรณีการติดต่อกับ SEM2 เหมือนกับกรณีติดต่อ SEM1 ต่างกันที่รหัสที่ใช้ตรวจสอบ

รูปที่ 4—18 เป็นแผนผังการติดต่อรับส่งข้อมูลทั้งหมดของระบบประกอบด้วย DC 1 เครื่อง, ESP 1 ตัว และ ESP 2 เครื่อง คือ SEM1 และ SEM2

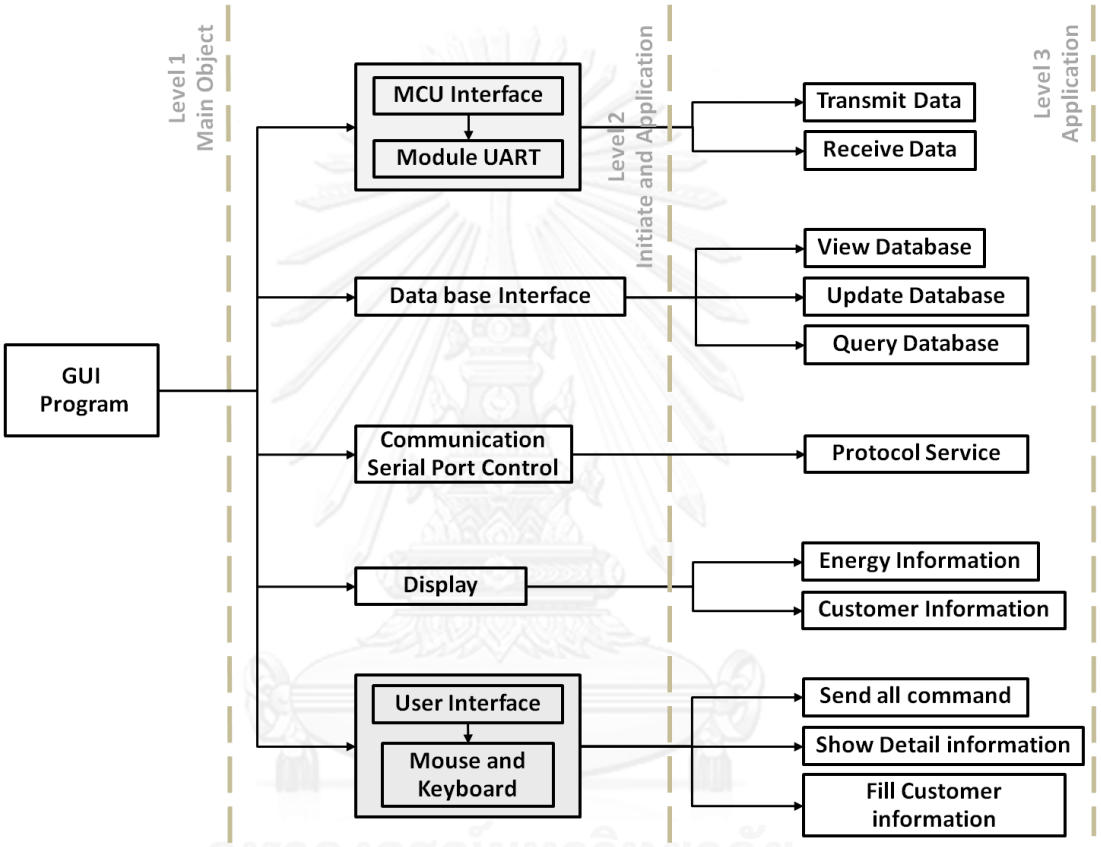
หลักการทำงานเริ่มจากการส่งคำสั่งเรียกดูรหัสมิเตอร์ (กรณี Check Meter Id) จาก SEM1 เพื่อตรวจสอบรหัสของ SEM1 ถ้าตรงทำการโหลดข้อมูลมาพักไว้ในโมดูล ZigBee ของตัวเอง ถ้ารหัสไม่ตรงจะไม่มีการโหลดข้อมูลไว้ จากนั้นรอคำสั่ง GET Profile (กรณี Special Get Profile Command) เมื่อตอบสนองต่อคำสั่งจะทำการส่งข้อมูลไปยัง ESP แล้วส่งต่อไป DC เพื่อจัดการข้อมูลต่อไป ส่วน SEM2 ดำเนินการเช่นเดียวกับ SEM1 แสดงดังรูปที่ 4—18



รูปที่ 4—18 แผนผัง การทำงานทั้งหมดของระบบอ่านมิเตอร์แบบอัตโนมัติประกอบด้วย SEM 2 ตัว ESP 1 ตัว และ DC 1 ตัว

4.3. โปรแกรมควบคุม Data Center (DC)

ทำหน้าที่การควบคุม DC สองอย่างคือ ติดต่อกับผู้ใช้ผ่านตัวประสานกราฟิกกับผู้ใช้ (Graphic User Interface: GUI) และจัดการข้อมูลที่รับเข้ามาจะเก็บไว้ในฐานข้อมูล (Data Base) ซึ่งทำให้ง่ายแก่ผู้ใช้เพราะมีส่วนที่แสดงการใช้พลังงานไฟฟ้า, การแสดงข้อมูลผู้ใช้ไฟฟ้า, ทำหน้าที่ติดต่อกับ DC ผ่านทางช่องทางข้อมูลอนุกรม (Serial Port) และทำหน้าที่ติดต่อกับกับฐานข้อมูล เพื่อทำการเพิ่ม, การลด, การแก้ไขข้อมูล แสดงตามรูปที่ 4—19



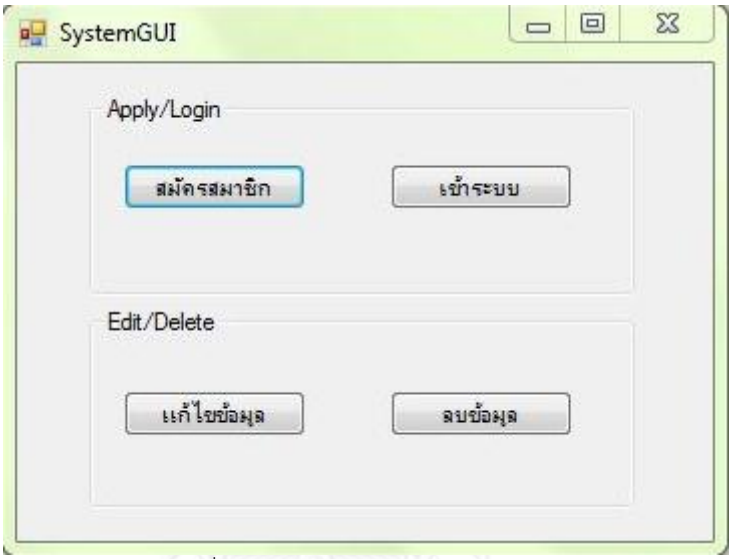
รูปที่ 4—19 โครงสร้างโปรแกรมควบคุมบนคอมพิวเตอร์

4.3.1. การทำงานของโปรแกรมส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้

โปรแกรมส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้ได้พัฒนาโดยใช้โปรแกรม Microsoft Visual Studio ใช้ภาษา Visual C# ช่วยในการพัฒนาเพื่อความสะดวกในการเข้าถึงระบบการอ่านข้อมูลแบบอัตโนมัติในเครือข่ายการทำงานของโพรโตคอล ZigBee ที่มี ESP เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่าง DC กับ SEM ในการเก็บข้อมูลลงฐานข้อมูลนั้นมีการออกแบบหน้าต่างแสดงผลไว้ได้แก่ หน้าต่างรายการเลือกหลัก (Main Manu), หน้าต่างการสมัคร, หน้าต่างแก้ไขข้อมูลผู้ใช้, หน้าต่างลบข้อมูลผู้ใช้ออกจากฐานข้อมูล, หน้าติดต่อสื่อสานผ่านช่องทางข้อมูลอนุกรมกับ DC และหน้าต่างแสดงแสดงข้อมูลการใช้ไฟฟ้า

4.3.1.1. **หน้าต่างรายการเลือกหลัก**

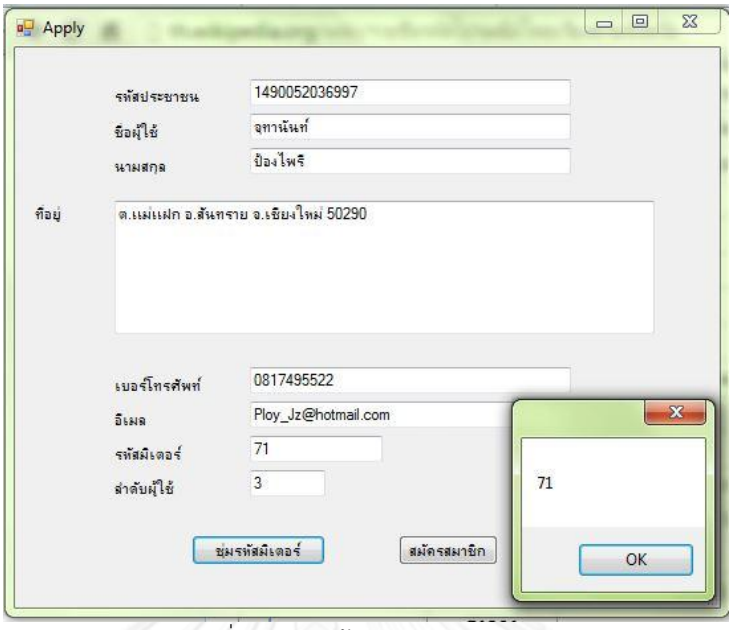
เป็นหน้าต่างแรกที่แสดงขึ้นมาเมื่อมีการติดต่อกับฐานข้อมูลเรียบร้อยแล้ว โดยหน้าต่างรายการเลือกหลักเป็นหน้าต่างที่จะเข้าสู้รายการหน้าต่างอื่นๆได้ หน้าต่างรายการเลือกหลักจะรวมปุ่มกดเกี่ยวกับข้อมูลผู้ใช้ทั้งหมดไม่ว่าจะเป็นปุ่มสมัครสมาชิก, ปุ่มแก้ไขข้อมูลเพื่อแก้ไขข้อมูลผู้ใช้, ปุ่มลบข้อมูลของผู้ใช้และที่สำคัญปุ่มกดเข้าระบบเพื่อเข้าระบบติดต่อกับมิเตอร์



รูปที่ 4—20 หน้าต่างรายการเลือกหลัก

4.3.1.2. **หน้าต่างสมัครสมาชิก**

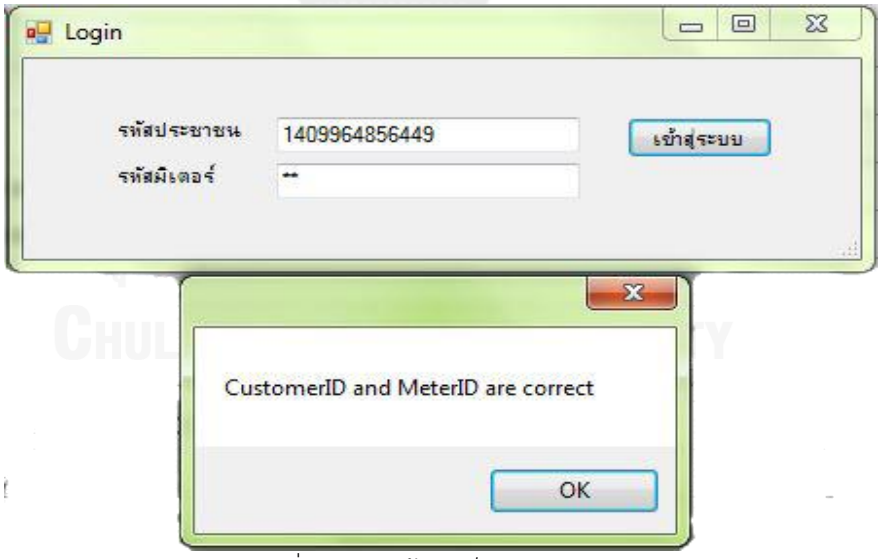
เมื่อกดปุ่มสมัครสมาชิกจากหน้ารายการเลือกหลักก็จะปรากฏ หน้าต่างการสมัครสมาชิกขึ้นมาดังรูปที่ 4—21 ผู้ใช้กรอกข้อมูลของตนเองตามความเป็นจริงตามหัวข้อต่างๆ ที่ปรากฏ เมื่อกรอกข้อมูลครบแล้วให้กดปุ่มซุ่มรหัสของ SEM โดยจะทำการซุ่มรหัสขึ้นมา 2 หลัก รหัสที่ได้ใช้อ้างอิงกับตัวมิเตอร์ไฟฟ้า จากนั้นกดปุ่มสมัครสมาชิกเพื่อบันทึกข้อมูลทั้งหมดลงในฐานข้อมูล (Data Base)



รูปที่ 4—21 หน้าต่างสมัครสมาชิก

4.3.1.3. **หน้าต่างล็อกอินระบบ**

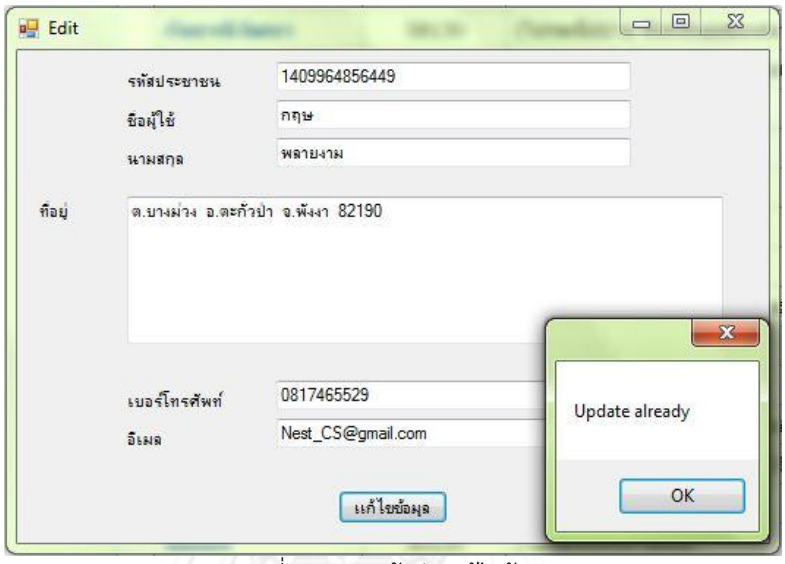
หน้าต่างล็อกอินจะปรากฏเมื่อผู้ใช้กดปุ่มเข้าระบบที่หน้าต่างรายการเลือกหลัก ให้ผู้ใช้กรอกรหัสประชาชน และรหัสมิเตอร์ที่ซุ่มได้ 2 หลัก เพื่อเข้าสู้ระบบต่อไป



รูปที่ 4—22 หน้าต่างล็อกอินระบบ

4.3.1.4. **หน้าต่างแก้ไขข้อมูล**

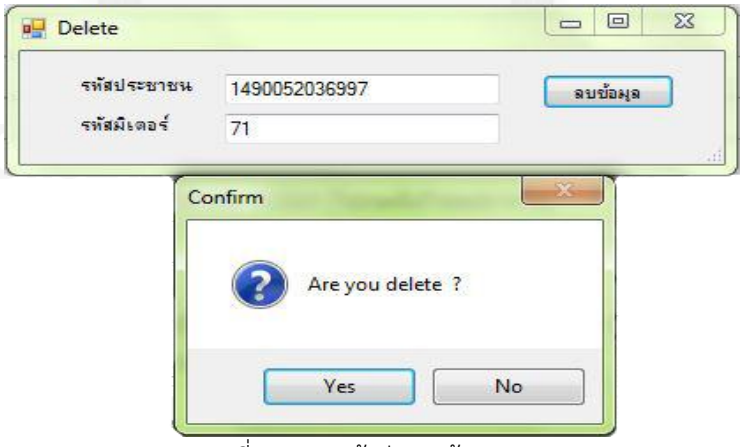
เมื่อผู้ใช้ต้องการแก้ไขข้อมูลของตนเองกดปุ่มแก้ไขข้อมูลจากหน้าต่างรายการเลือกหลัก จะปรากฏหน้าต่างแก้ไขข้อมูลขึ้นมา ให้ผู้ใช้กรอกรหัสประชาชนเดิม แล้วกรอกข้อมูลใหม่ที่ต้องการแก้ไข แล้วกดแก้ไขข้อมูล ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงข้อมูลในฐานข้อมูล



รูปที่ 4—23 หน้าต่างแก้ไขข้อมูล

4.3.1.5. **หน้าต่างลบข้อมูล**

เมื่อต้องการลบข้อมูลผู้ใช้ของคนนั้นนั้นทั้งหมดในฐานข้อมูลให้กรอกรหัสประชาชนและรหัสมิเตอร์ก็สามารถลบข้อมูลทั้งหมดในระบบได้

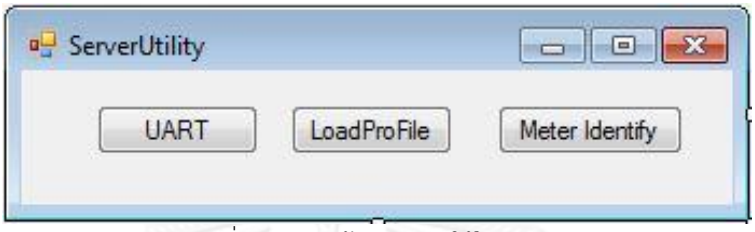


รูปที่ 4—24 หน้าต่างลบข้อมูล

4.3.1.6. **หน้าต่างเลือกใช้ประโยชน์ทางเซิร์ฟเวอร์**

เมื่อล็อกอินเข้ามาจะปรากฏหน้าต่างนี้ขึ้นมาให้ผู้เลือกเข้าโหมดต่างๆ ดังนี้

- ปุ่มกด UART เป็นปุ่มกดเชื่อมต่อพอร์ตข้อมูลอนุกรมระหว่างโปรแกรมส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้กับ DC
- ปุ่มกด LoadProFile เมื่อกดแล้วจะแสดงข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าของผู้ใช้
- ปุ่มกด Meter Identify เมื่อกดแล้วจะแสดงข้อมูลลักษณะมิเตอร์ไฟฟ้าของผู้ใช้



รูปที่ 4—25 หน้าต่างเลือกใช้โหมดต่างๆ

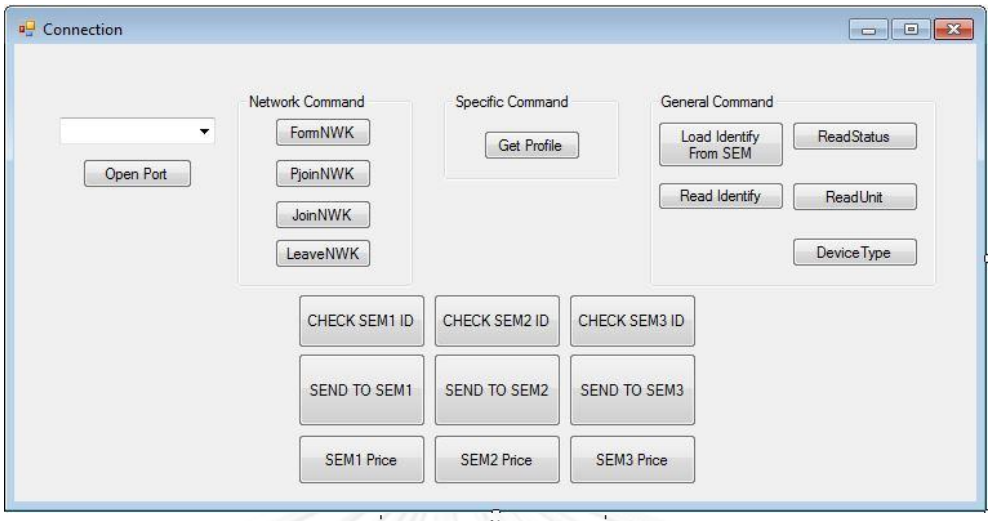
4.3.1.7. **หน้าต่างการเชื่อมต่อ**

เมื่อต้องการเชื่อมต่อโปรแกรมกราฟิกผู้ใช้กับ DC โดยผ่านพอร์ตข้อมูลอนุกรม กดปุ่ม UART ที่หน้าต่างเลือกใช้ประโยชน์ทางเซิร์ฟเวอร์จะปรากฏหน้าต่างเชื่อมต่อดังรูปที่ 4—26 โดยเลือกคอมพอร์ตที่จะใช้เชื่อมต่อ เมื่อเลือกแล้วกดปุ่ม Open Port เพื่อทำการเชื่อมต่อ มีปุ่มที่สำคัญต่อไปนี้

- ปุ่ม CHECK SEMx ID โดยส่งเพื่อตรวจรหัสมิเตอร์ให้ตรงกันเพื่อโหลดข้อมูลออกจากตัว SEM ต่างๆ
- ปุ่ม SEND TO SEMx เมื่อกดปุ่มคำสั่งต่างๆใน Group Box แล้วให้กดปุ่มส่งนี้เพื่อส่งคำสั่งแบบเจาะจง (Send Unicast) ไปยังมิเตอร์ตัวนั้นๆ
- ปุ่ม SEMx Price เมื่อกดจะทำการส่งราคาไปเก็บไว้ที่ ESP เพื่อรอ SEM เรียกดูข้อมูลออกต่อไป

นอกจากนี้ยังมี Group Box อีก 3 กลุ่ม ดังนี้คือ

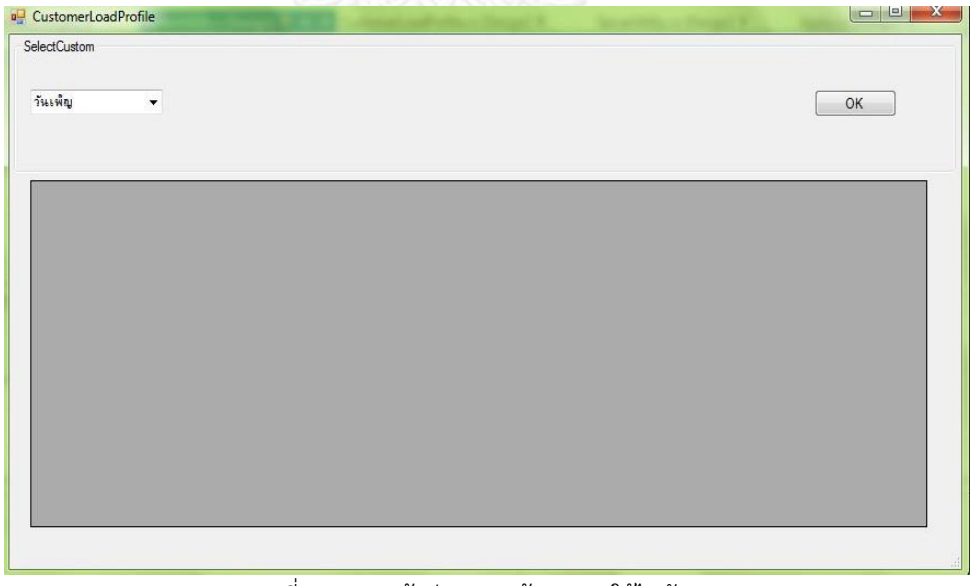
1). กลุ่มคำสั่งเครือข่ายประกอบด้วยปุ่มที่ควบคุมการสร้างเครือข่ายของ DC มีดังนี้คือ ปุ่มสร้างเครือข่าย, ปุ่มอนุญาตให้เข้าร่วมเครือข่าย, ปุ่มออกจากเครือข่าย
2). กลุ่มคำสั่งเฉพาะ (Specific Command) ประกอบด้วยปุ่ม Get Profile สั่งคำสั่งเพื่อเรียกดู Load Profile
3). กลุ่มคำสั่งทั่วไป (General Command) เป็นกลุ่มของปุ่มคำสั่งที่ใช้สั่งให้ SEM เขียน หรืออ่านข้อมูลของ Attribute นั้นๆ ออกมา



รูปที่ 4—26 หน้าต่างการเชื่อมต่อ

4.3.1.8. **หน้าต่างแสดงข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้า**

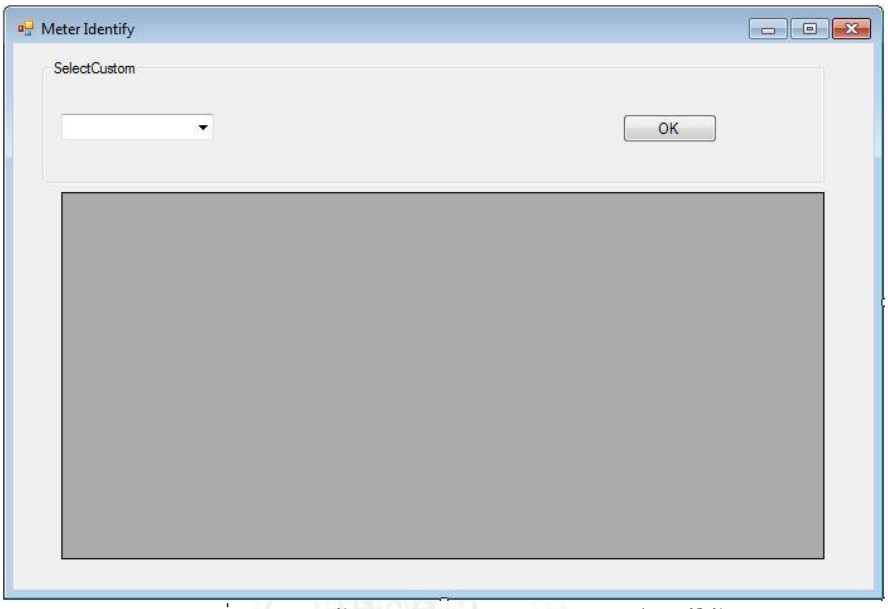
หน้าต่างนี้แสดงเมื่อกดปุ่ม LoadProFile ในหน้าต่างเลือกใช้ประโยชน์ทางเซิร์ฟเวอร์ หน้าต่างนี้แสดงค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผู้ใช้ต้องการทราบว่าใช้พลังงานไปจำนวนเท่าไร สามารถเลือกผู้ใช้ได้ในช่องเล็กๆ ด้านซ้ายมือเพื่อเลือกชื่อผู้ที่ต้องการแสดงการใช้พลังงานไฟฟ้า เมื่อเลือกชื่อแล้วกดปุ่ม OK เพื่อแสดงข้อมูลต่อไป



รูปที่ 4—27 หน้าต่างแสดงข้อมูลการใช้ไฟฟ้า

4.3.1.9. **หน้าต่างแสดงลักษณะมิเตอร์ของผู้ใช้**

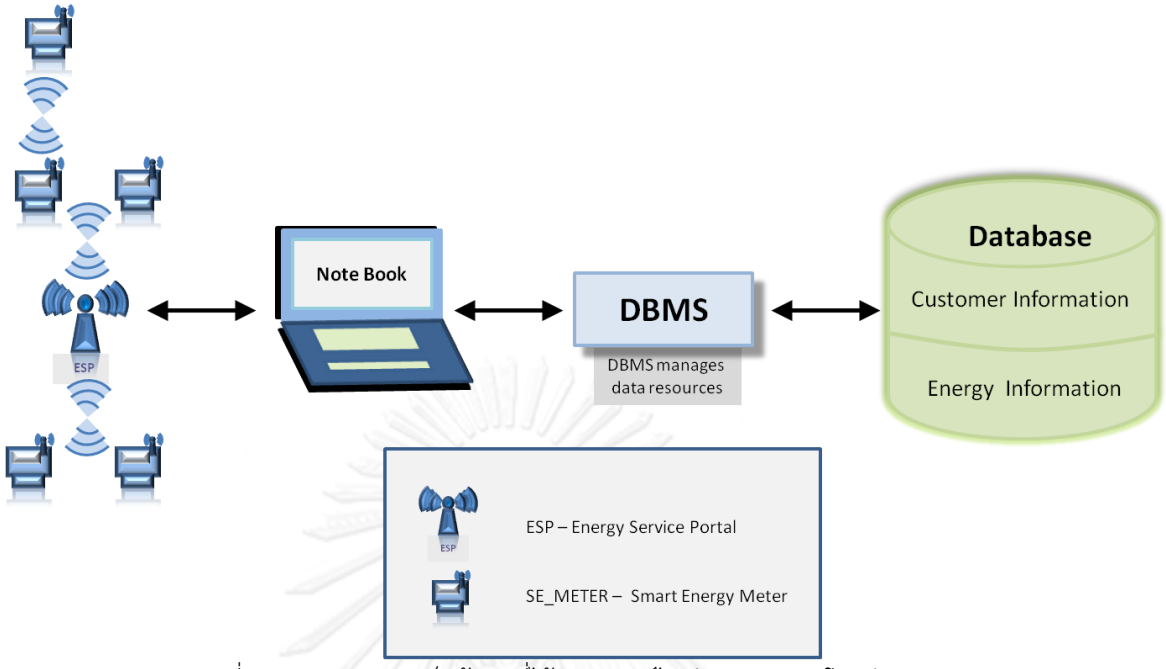
โดยแสดงค่าของอุปกรณ์การวัดว่าเป็นอย่างไร โดยทำการแสดงค่าสถานะของอุปกรณ์, แสดงประเภทของอุปกรณ์ที่ใช้วัดในที่นี้เป็นอุปกรณ์วัดไฟฟ้า และแสดงหน่วยของการวัด เช่น kWh, m^3, ft^3 เป็นต้น



รูปที่ 4—28 หน้าต่างแสดงแสดงลักษณะมิเตอร์ของผู้ใช้

4.4. ระบบฐานข้อมูล (Database System) [14]

ระบบฐานข้อมูลคือศูนย์รวมของข้อมูลต่างๆ ที่มีความสัมพันธ์กัน (Relationship) โดยจะมีกระบวนการจัดการหมวดหมู่ข้อมูลอย่างมีระเบียบแบบแผน ก่อให้เกิดฐานข้อมูลที่เป็นแหล่งรวมของข้อมูลจากแผนกต่างๆ ซึ่งถูกจัดเก็บไว้อย่างมีระบบภายในฐานข้อมูลชุดเดียว ผู้ใช้งานแต่ละแผนกสามารถเข้าถึงข้อมูลส่วนกลางนี้เพื่อนำไปประมวลผลร่วมกันได้ และการที่มีศูนย์กลางข้อมูลเพียงแหล่งเดียว รวมถึงความสามารถในการเข้าถึงข้อมูลเพื่อใช้งานร่วมกันได้จะช่วยแก้ปัญหาความซ้ำซ้อนข้อมูล และที่สำคัญ ข้อมูลในฐานข้อมูลจะไม่ผูกติดกับโปรแกรม กล่าวคือ จะมีความอิสระในข้อมูล (Program-Data Independence) ระบบฐานข้อมูลมีความสัมพันธ์ดังรูป

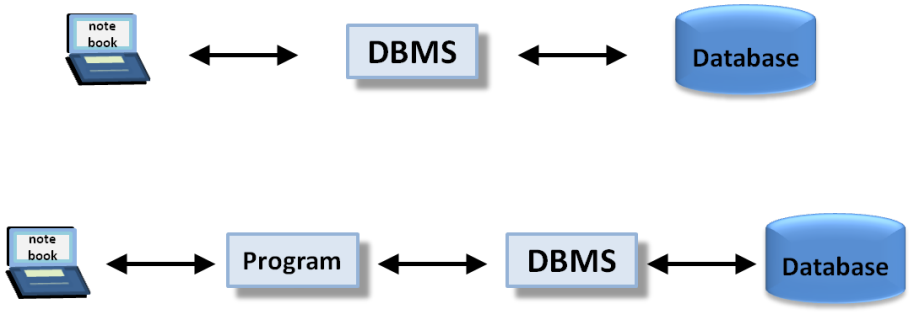


รูปที่ 4—29 แสดงการเก็บข้อมูลที่ได้จากมิเตอร์ไปยัง Database โดยผ่าน DBMS

รูปที่ 4—29 เป็นแผนภาพที่แสดงถึงระบบทั้งหมดของ AMI (Automatic metering Infrustation) โดยส่วนที่เป็นการจัดเก็บขอมูลนั้นผ่าน ระบบจัดการฐานข้อมูล (Database Management System : DBMS) ซึ่งการจัดการข้อมูลต่างๆนั้นต้องทำผ่านระบบจัดการฐานข้อมูล

4.4.1. ระบบจัดการฐานข้อมูล (Database Management System : DBMS)

DBMS เป็นซอฟแวร์หรือโปรแกรมที่ใช้สำหรับโต้ตอบกับผู้ใช้งาน โดย DBMS จะเป็นตัวกลางในการโต้ตอบระหว่างผู้ใช้งานกับฐานข้อมูล ซึ่งผู้ใช้งานสามารถโต้ตอบกับฐานข้อมูลผ่าน DBMS โดยตรงหรือผ่านโปรแกรมประยุกต์ก็ได้ เช่น การสร้างโปรแกรมด้วยภาษา Visual Basic หรือ JAVA และมีการเขียนโปรแกรมเพื่อโต้ตอบกับ DBMS ที่ใช้งาน เป็นต้น ดังรูป



รูปที่ 4—30 บนการโต้ตอบ DBMS โดยตรง ล่างการโต้ตอบกับ DBMS ด้วยการผ่านโปรแกรมที่เขียนขึ้น

สำหรับในด้านความสะดวกของ DBMS ที่มีต่อผู้ใช้งานเป็นไปตามคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1). อนุญาตให้ผู้ใช้สามรถสร้างฐานข้อมูล ซึ่งปกติจะเรียกใช้ผ่าน Data Definition Language(DDL) โดย DDL จะอนุญาตให้ผู้ใช้กำหนดชนิดข้อมูลและโครงสร้าง รวมถึงข้อบังคับ (Constraints) ในข้อมูลที่จะจัดเก็บลงในฐานข้อมูล

2). เมื่อฐานข้อมูลสร้างขึ้น มีการกำหนดโครงสร้างและชนิดข้อมูลเป็นที่เรียบร้อยแล้วก็จะสามารถบันทึกข้อมูลได้โดยผู้ใช้งานสามารถทำการเพิ่ม ปรับปรุง ลบ และเรียกดูข้อมูลจากฐานข้อมูลได้ด้วยการเรียกใช้ผ่าน Data Manipulation Language (DML) ซึ่งมักจะใช้ภาษา SQL เป็นภาษาสอบถามข้อมูล (Query Language) และภาษาสอบถามข้อมูลนี้เองผู้ใช้ทั่วไปสามารถเรียกใช้งานเพื่อแสดงผลข้อมูลหรือรายงานเพิ่มเติมได้ด้วยตนเอง ซึ่งแตกต่างจากวิธีแฟ้มข้อมูลที่หากผู้ใช้ต้องการสืบค้นข้อมูลเพิ่มเติม จะต้องพึ่งพาโปรแกรมเมอร์ให้เขียนโปรแกรมใหม่ทุกครั้งไป

3). สามารถควบคุมการเข้าถึงฐานข้อมูลได้ ประกอบด้วย

- ควบคุมความปลอดภัยของระบบ (Security System) สามารถกำหนดสิทธิ์การใช้งานให้แก่ผู้ใช้ในระดับต่างๆ ได้ ดั้งนั้นผู้ใช้ที่ไม่มีสิทธิ์ในการเข้าถึงฐานข้อมูลจะไม่สามารถเข้ามาใช้งานฐานข้อมูลที่ตนถูกจำกัดสิทธิ์ได้

- ความคงสะภาพของระบบ (Integrity System) เป็นการบำรุงรักษาที่จัดเก็บให้มีความถูกต้องตรงกัน

- การควบคุมสภาวะการทำงานพร้อมกัน (Concurrency Control) ตามแนวคิดของระบบฐานข้อมูลนั้น ข้อมูลจะอยู่ศูนย์กลางเพียงแหล่งเดียว และสามารถแชร์การใช้งานร่วมกันได้

4.4.2. **พื้นฐานการสร้างแบบจำลองข้อมูล (Data Model Basic Building Block)**

สำหรับพื้นฐานการสร้างแบบจำลองข้อมูล โดยทั่วไปประกอบด้วยอ็นติตี้ แอตตริบิวต์ ความสัมพันธ์ และข้อบังคับ

- เอ็นติตี้ (Entities)

เอ็นติตี้คือ ทุกๆ สิ่งไม่ว่าจะเป็นบุคคล สถานที่ สิ่งของ หรือเหตุการณ์ ที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลที่รวบรวมไว้เพื่อการจัดเก็บ เอ็นติตี้ถือเป็นตัวแทนของวัตถุในโลกแห่งความเป็นจริง ตัวอย่างเช่น เอ็นติตี้ลูกค้า เอ็นติตี้สินค้า นอกจากนี้เอ็นติตี้ยังอาจเป็นนามธรรม (Abstractions) ก็ได้ เช่น เอ็นติตี้เที่ยวบิน เป็นต้น

- แอตตริบิวต์ (Attribute)

แอตตริบิวต์คือ คุณลักษณะของเอ็นติตี้ เช่น เอ็นติตี้ลูกค้าประกอบด้วยแอตตริบิวต์รหัสลูกค้า ชื่อ-นามสกุล ที่อยู่ โทรศัพท์ หรือกล่าวได้ว่าแอตตริบิวต์เป็นฟิลด์ในระบบไฟล์นั่นเอง

- ความสัมพันธ์ (Relationships)

ความสัมพันธ์ระหว่างเอ็นติตี้ เช่น ความสัมพันธ์ระหว่างลูกค้ากับบัญชีธนาคาร แบบจำลองข้อมูลมีความสัมพันธ์ 3 ชนิดด้วยกันคือ ความสัมพันธ์แบบหนึ่งต่อหนึ่ง (one-to-one) ความสัมพันธ์แบบหนึ่งต่อกลุ่ม (one-to-many) ความสัมพันธ์แบบกลุ่มต่อกลุ่ม (many-to-many)

- ข้อบังคับ (Constraints)

ข้อบังคับ กฎเกณฑ์เพื่อการบรรจุข้อมูล ซึ่งกฎข้อบังคับช่วยให้เกิดความมั่นใจในความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกัน เพื่อลดความสอดคล้องตรงกันของข้อมูล เช่น เงินเดือนพนักงานจะต้องมีค่าระหว่าง 6000 ถึง 150000 บาท หรือนักศึกษาสามารถลงทะเบียนเรียนได้หลายหน่วยกิต แต่รวมแล้วต้องไม่เกิน 21 หน่วยกิต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5

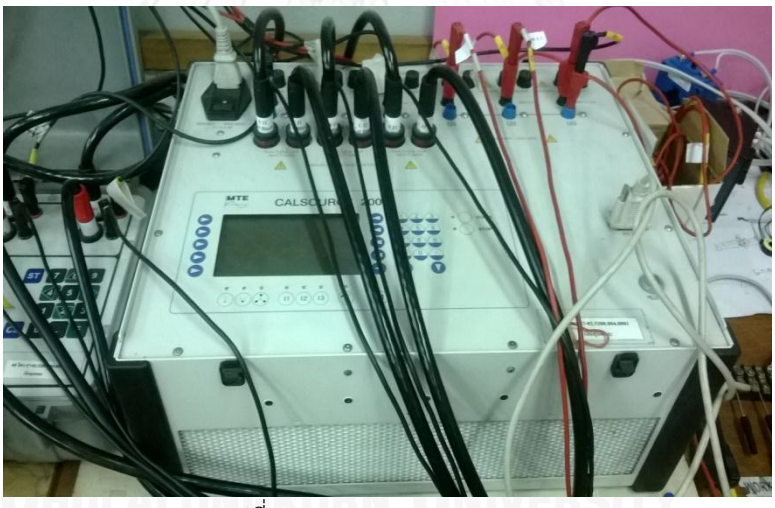
การทดลองและผลการทดลอง

บทนี้กล่าวถึงการทดลองความแม่นของ SEM ให้มีความแม่นในการวัดพลังงานให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEC ส่วนการสื่อสารเป็นการทดลองการสื่อสารโดยใช้ SEM 2 ตัว สื่อสารกับ ESP โดยใช้รูปแบบคำสั่งของ Smart Energy Profile ที่เป็นไปตามมาตรฐานของทาง ZigBee Alliance

5.1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

5.1.1. แหล่งจ่ายพลังงาน CALSOURCE 200

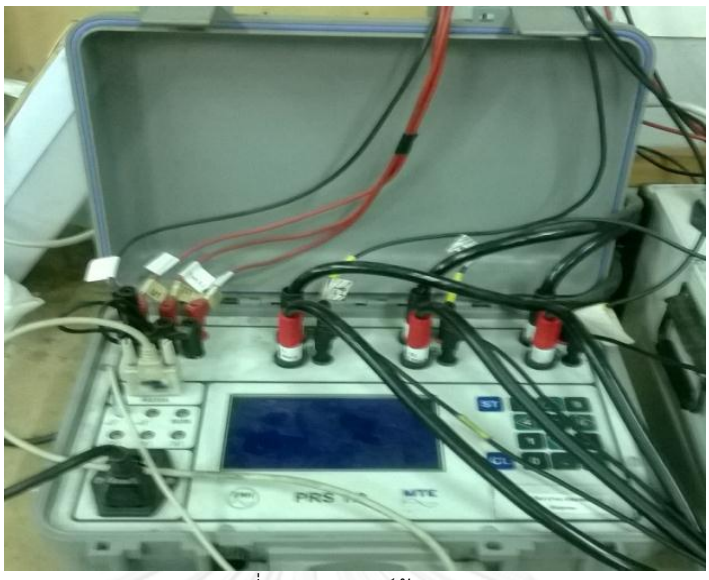
ใช้แหล่งจ่ายพลังงานที่ผลิตโดยบริษัท MTE ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันและกระแสให้กับมิเตอร์ที่ต้องการทดสอบ (SEM) สามารถจ่ายไฟได้ทั้งแบบ 1 เฟส และ 3 เฟส ที่กระแสสูงสุด 120 แอมแปร์ นอกจากนี้ยังสามารถทำให้เกิดความต่างเฟส (Phase Sift) หรือตัวประกอบกำลัง (Power Factor; PF.) ที่องศาต่างๆที่ความถี่ 45-65 Hz ได้



รูปที่ 5—1 CALSOURCE 200

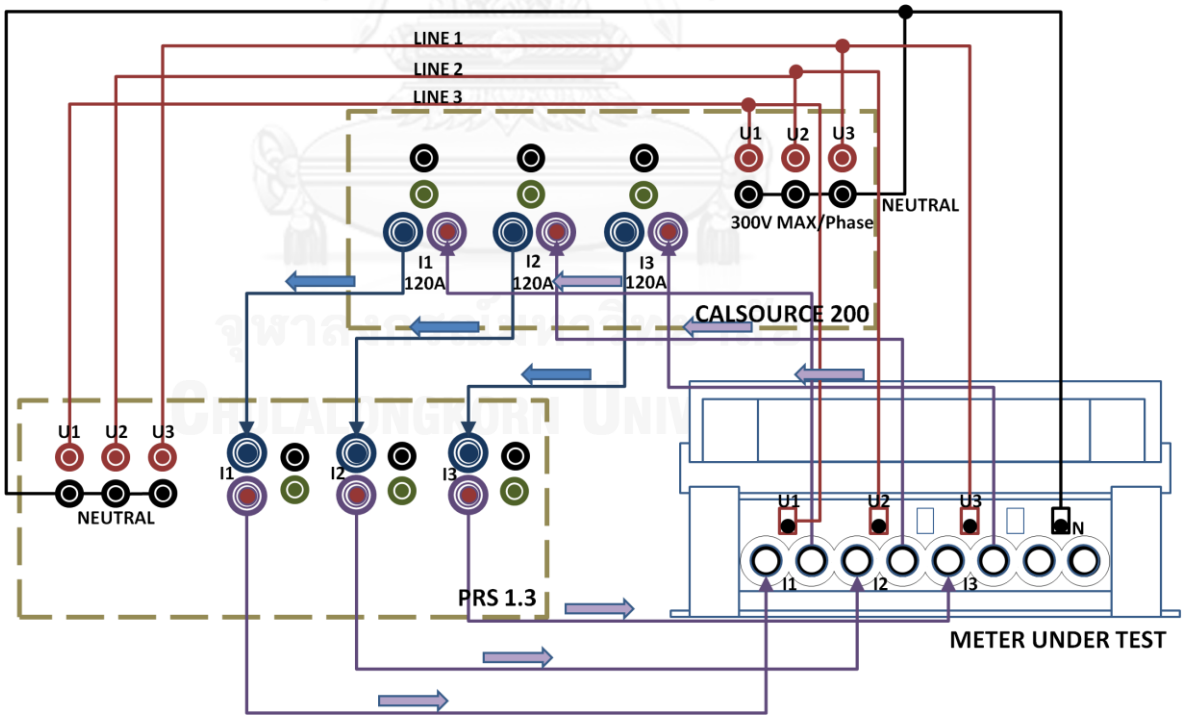
5.1.2. มิเตอร์อ้างอิง PRS 1.3

เป็นมิเตอร์ที่ใช้วัดเทียบกับ SEM ที่ได้พัฒนาขึ้น มีความแม่นสูงถึง 0.05% ซึ่งมากกว่าความแม่นที่จะทดสอบ (Class 1) อยู่ถึง เท่า เมื่อวัดเทียบกับค่าพลังงานที่ 20SEM วัดได้ โดยดูจากสัญญาณที่ขา LED ของไอซี STPMC1 มิเตอร์อ้างอิงแสดงดังรูปที่ 5—2



รูปที่ 5—2 มิเตอร์อ้างอิง

ในการจะทดสอบความแม่นของมิเตอร์ที่ถูกทดลอง (Meter Under Test; MUT) จะต้องจ่ายแรงดันจาก CALSOURCE 200 ไปยัง PRS 1.3 ขนานไปกับ MUT ซึ่งในที่นี้ก็คือ SEM ที่ถูกพัฒนาขึ้น และจ่ายกระแสผ่าน MUT ดังแสดงการต่อดังรูปที่ 5—3



รูปที่ 5—3 ไดอะแกรมการต่อวัดระบบ 3 เฟส 4 สาย ที่พิกัด 100 แอมป์

5.2. การทดสอบความแม่น

เริ่มโดยการคำนวณอัตราส่วนขดลวดปฐมภูมิต่อทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแส จะได้ค่า K_s ดังสมการ

$$K_s = \left(\frac{R_b}{Turn\ ratio}\right)*1000 = \frac{0.25}{2500} = 0.1 \text{ มิลลิโวลต์ต่อแอมแปร์}$$

การกำหนดค่าบิตเริ่มต้นให้กับไอซี STPMC1 ที่สำคัญๆ มีดังนี้ [2]

- TCS Bit คือบิตที่ถูกเซตขึ้นเพื่อเลือกอุปกรณ์ในการตรวจจับกระแส ในที่นี้เซตค่าเป็นหนึ่งเพื่อเลือก Rogowski Coil หรือ หม้อแปลงกระแส
- FRS Bit คือบิตที่ถูกกำหนดว่าให้ไอซีเลือกวัดความถี่ 50 หรือ 60 Hz
- KMOT Bit คือบิตที่ถูกกำหนดว่าให้วัด LED Blink จากเฟสไหน คือ R, S, T หรือทั้งสาม
- LVS Bit คือบิตที่ถูกกำหนดว่า LED Pulse Blink วัดพลังงาน Active หรือ Reactive
- PM Bit คือบิตที่เลือกความแม่นยำของมิเตอร์ มี Class 1 และ Class 0.1

ตาราง 5—1 ตารางแสดงการกำหนดค่า Configuration bit บนไอซี STPMC1 ที่สำคัญ

ชื่อบิต	กำกนดค่า	ความหมาย
TCS	1	หม้อแปลงกระแส
FRS	0	50Hz
KMOT	1, 2 และ3	Phase R, S และT
LVS	0	Active Power
PM	1	Class 0.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ขั้นแรกต้องปรับเทียบ SEM ก่อน โดยการกำหนดค่าเริ่มต้นต่างๆของ STPMC1 ตามตาราง 5—1 จากนั้นเริ่มด้วยการจ่ายแรงดันอ้างอิงที่ 220V กระแสอ้างอิงที่ 10A และ PF. = 1 พบว่ามีค่าความผิดพลาดของการวัดอยู่เนื่องจากเกิดเฟสชิฟอยู่ในส่วนของ current sensing, voltage sensing และ CT จากนั้นจึงอ่านค่ารีจิสเตอร์ของกระแสและแรงดันของแต่ล่ะเฟส แล้วกรอกข้อมูลที่อ่านได้ลงในแคลชีตดังรูปที่ 5—4 เพื่อความเป็นไปได้ในการที่จะใช้ Phase compensation bit ในการชดเชยค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นของพัลซ์พลังงานที่วัดจาก LED Blink เมื่อวัดเทียบกับมิเตอร์อ้างอิงให้เข้าใกล้ศูนย์มากที่สุด

Calibrators Calculation				
Av I	0x	184	388	Insert average current register reading
Av U	0x	5DD	1501	Insert average voltage register reading
Ci		627.655533	1001110011	Write this value into the device
Cu		636.5658861	1001111100	Write this value into the device

รูปที่ 5—4 แคลชีตไว้ตรวจสอบค่ากระแสและแรงดันที่อ่านได้อยู่ในขอบเขตที่ใช้งานหรือไหม

จากนั้นจึงวัดค่าความผิดพลาดโดยค่ากระแสต่างๆตามมาตรฐานการวัดความแม่น ซึ่งค่ากระแสทดสอบได้ถูกกำหนดไว้ตามตาราง 5—2 ตามมาตรฐาน IEC 62052-11 ดังนี้ [15]

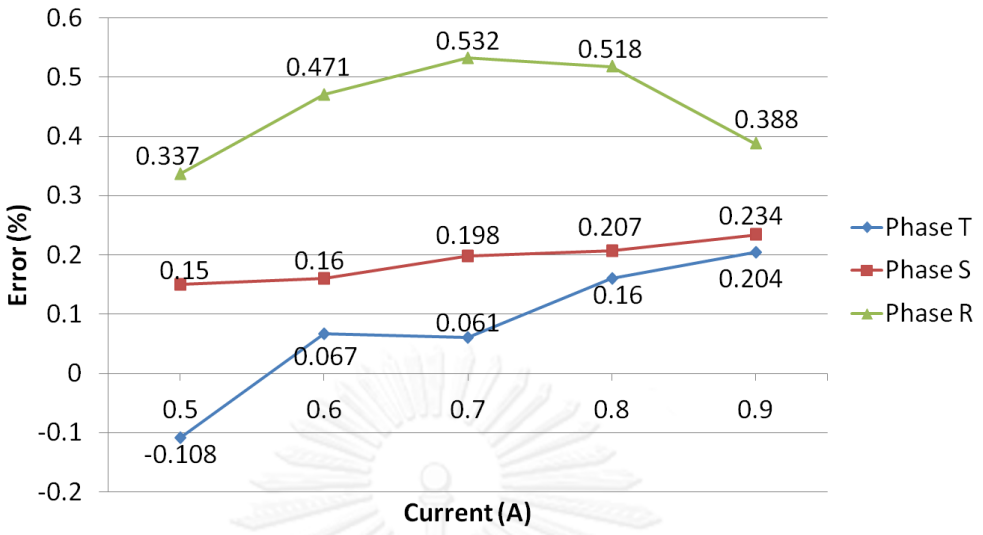
ตาราง 5—2 เปอร์เซนต์ของค่าความผิดพลาดทางพลังงาน

Value of current		Power factor	Percentage error limits for meters of class	
For direct connected meters	For transformer operation meters		class 1	class 2
$0.05I_b \leq I < 0.1I_b$	$0.02I_b \leq I < 0.05I_b$	1	± 1.5	± 2.5
$0.1I_b \leq I \leq I_{max}$	$0.05I_b \leq I \leq I_{max}$	1	± 1.0	± 2.0
$0.1I_b \leq I < 0.2I_b$	$0.05I_b \leq I < 0.1I_b$	0.5 inductive	± 1.5	± 2.5
		0.8 capacitive	± 1.5	-
$0.2I_b \leq I \leq I_{max}$	$0.1I_b \leq I \leq I_{max}$	0.5 inductive	± 1.0	± 2.0
		0.8 capacitive	± 1.0	-

5.2.1. **ผลการทดลอง**

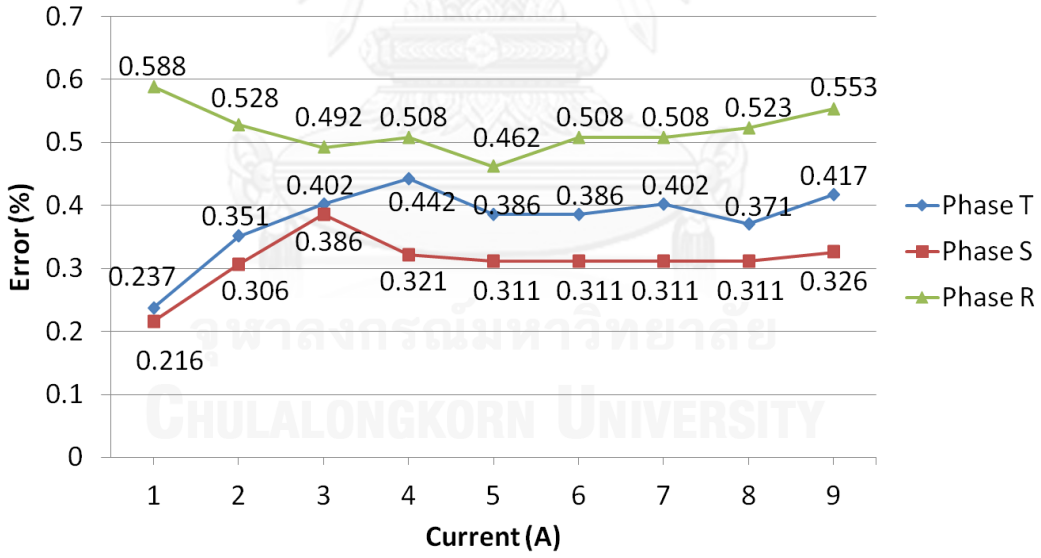
จากการทดลองได้ทดสอบวัดเทียบค่าความผิดพลาดเทียบกับมิเตอร์อ้างอิง ค่ากระแสและ PF. ที่ใช้ในการทดลองปรับค่าตามตารางข้างต้นอ้างอิงโดยใช้ในโหมด For direct connected meters ที่เงื่อนไขต่างๆตามตาราง 5—2 ผลที่ได้ของค่าความผิดพลาดมีค่าดังกราฟต่อไปนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



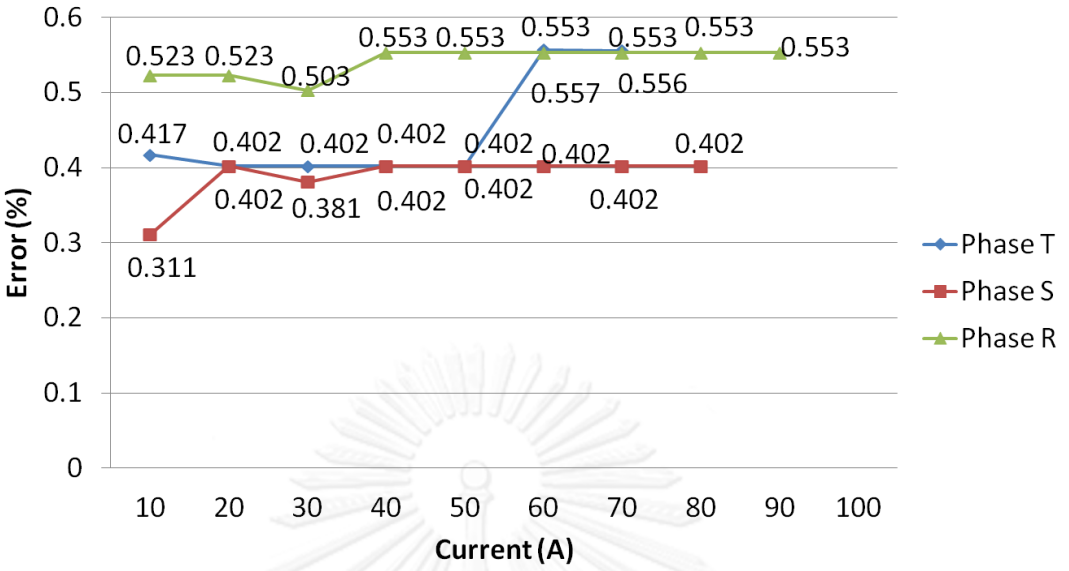
รูปที่ 5—5 กราฟค่าความผิดพลาดสูงสุดของพลังงานแอคทีฟช่วงกระแส $0.5 \leq I < 1$ ที่ PF = 1

จากรูปที่ 5—5 ค่าความผิดพลาดสูงสุดของแต่ละเฟสมีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้คือไม่เกิน ± 1.5 ซึ่งแต่ละเฟสมีค่าความผิดพลาดสูงสุดอยู่ในช่วงดังรูป



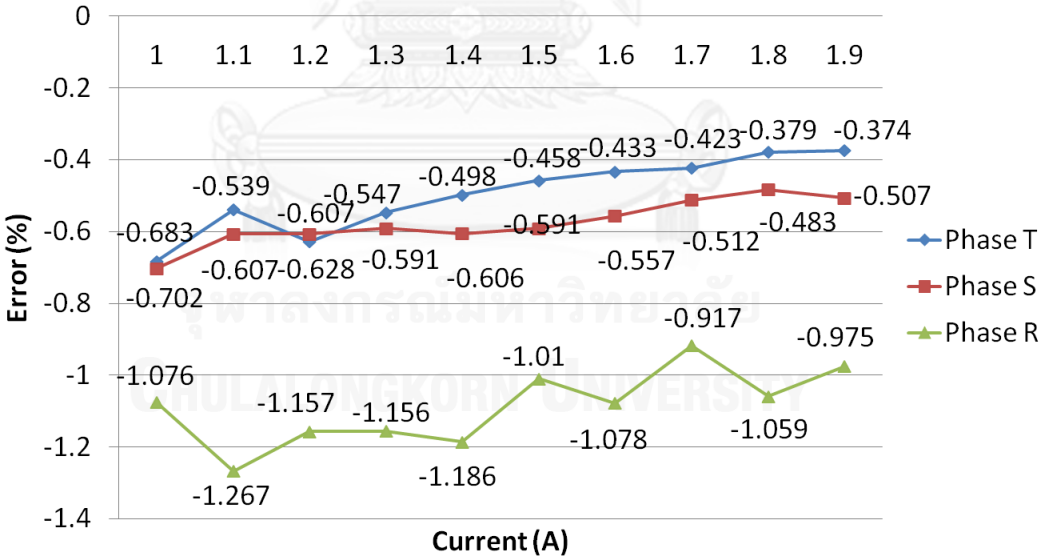
รูปที่ 5—6 กราฟค่าความผิดพลาดสูงสุดของพลังงานแอคทีฟช่วงกระแส $1 \leq I \leq 9$ ที่ PF = 1

จากรูปที่ 5—6 ค่าความผิดพลาดสูงสุดของแต่ละเฟสมีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้คือไม่เกิน ± 1.0 ซึ่งแต่ล่ะเฟสมีค่าความผิดพลาดสูงสุดอยู่ในช่วงดังรูป



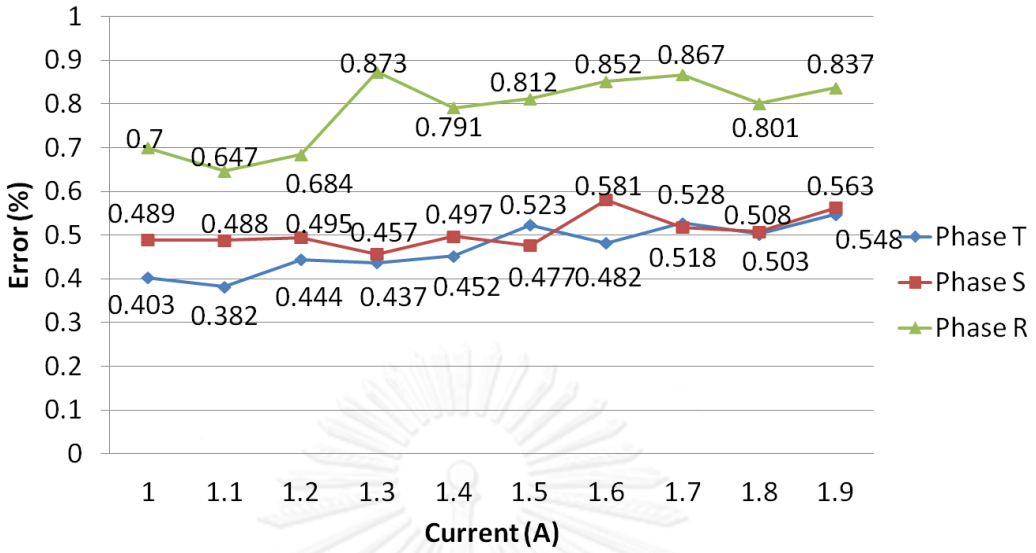
รูปที่ 5—7 กราฟค่าความผิดพลาดสูงสุดของพลังงานแอคทีฟช่วงกระแส $\mathbf{10 \leq I \leq 100}$ ที่ PF = 1

จากรูปที่ 5—7 ค่าความผิดพลาดสูงสุดของแต่ละเฟสมีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้คือไม่เกิน $\pm$ 1.0 ซึ่งแต่ละเฟสมีค่าความผิดพลาดสูงสุดอยู่ในช่วงดังรูป



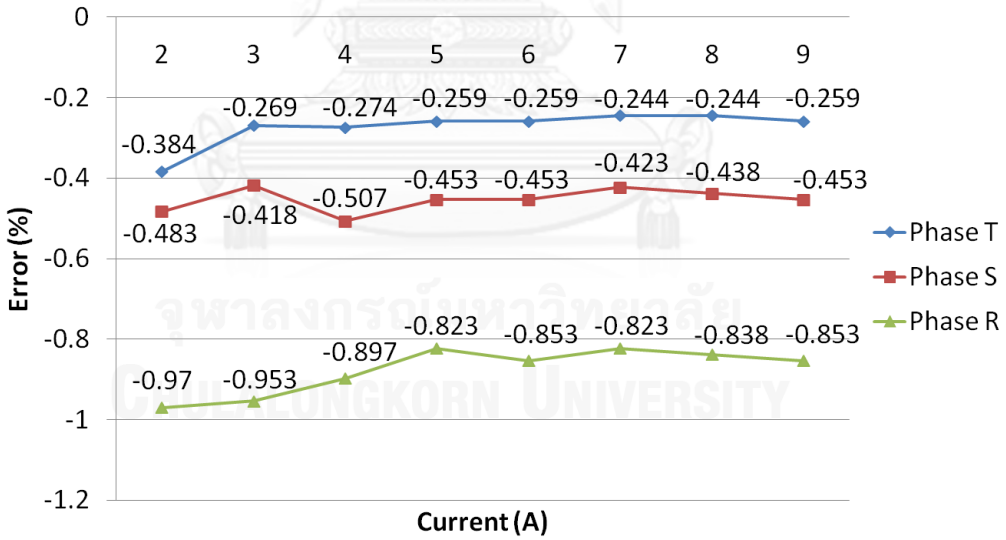
รูปที่ 5—8 กราฟค่าความผิดพลาดสูงสุดของพลังงานแอคทีฟช่วงกระแส $\mathbf{1 \leq I < 2}$ ที่ PF = 0.5 Inductive

จากรูปที่ 5—8 ค่าความผิดพลาดสูงสุดของแต่ละเฟสมีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้คือไม่เกิน $\pm$ 1.5 ซึ่งแต่ละเฟสมีค่าความผิดพลาดสูงสุดอยู่ในช่วงดังรูป



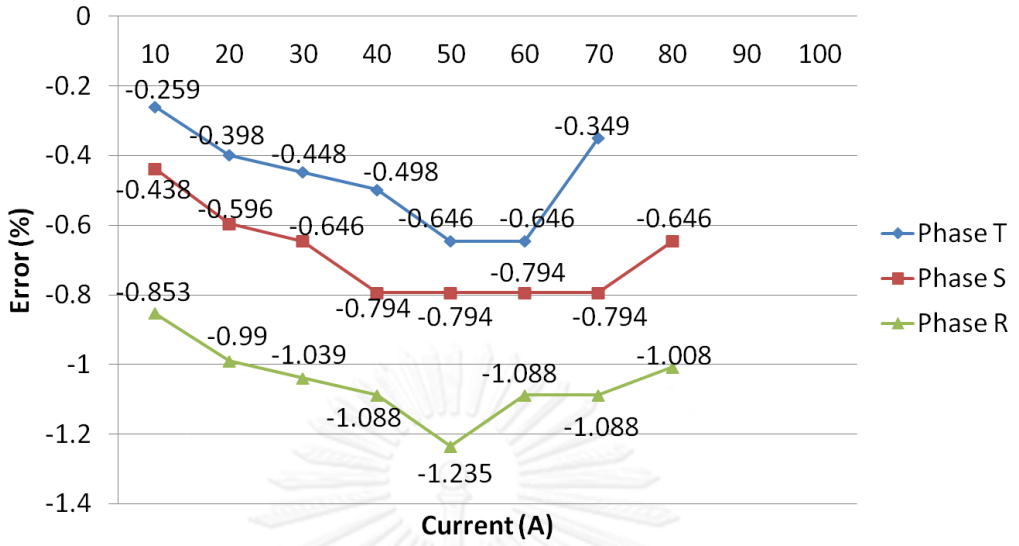
รูปที่ 5—9 กราฟค่าความผิดพลาดสูงสุดของพลังงานแอคทีฟช่วงกระแส $1 \leq I < 2$ ที่ PF = 0.8 Capacitive

จากรูปที่ 5—9 ค่าความผิดพลาดสูงสุดของแต่ละเฟสมีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้คือไม่เกิน ± 1.5 ซึ่งแต่ละเฟสมีค่าความผิดพลาดสูงสุดอยู่ในช่วงดังรูป



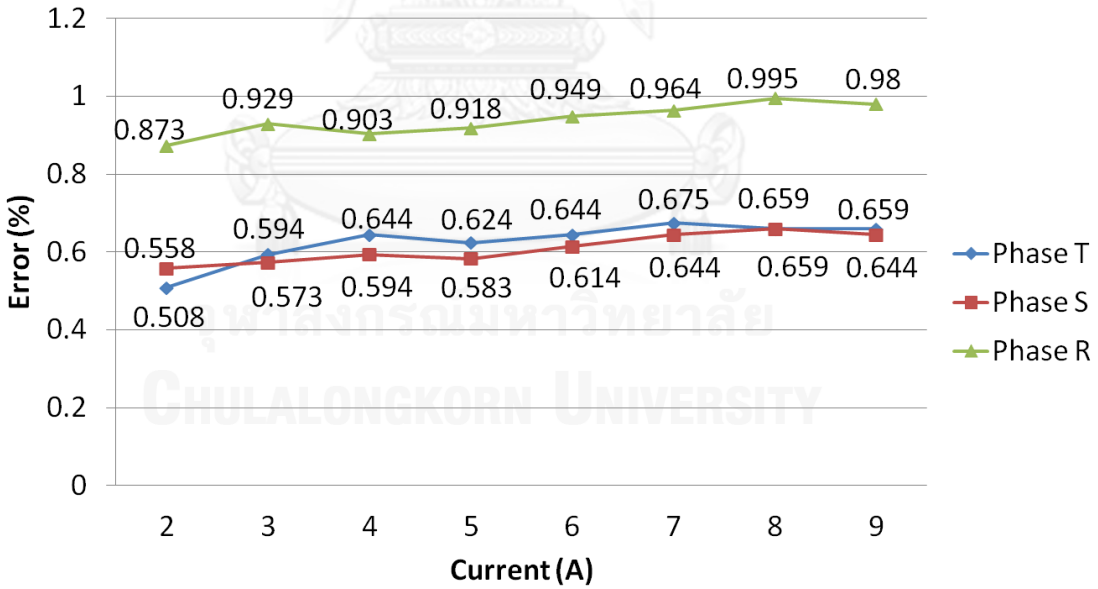
รูปที่ 5—10 กราฟค่าความผิดพลาดสูงสุดของพลังงานแอคทีฟช่วงกระแส $2 \leq I < 10$ ที่ PF = 0.5 Inductive

จากรูปที่ 5—10 ค่าความผิดพลาดสูงสุดของแต่ละเฟสมีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้คือไม่เกิน ± 1.0 ซึ่งแต่ละเฟสมีค่าความผิดพลาดสูงสุดอยู่ในช่วงดังรูป



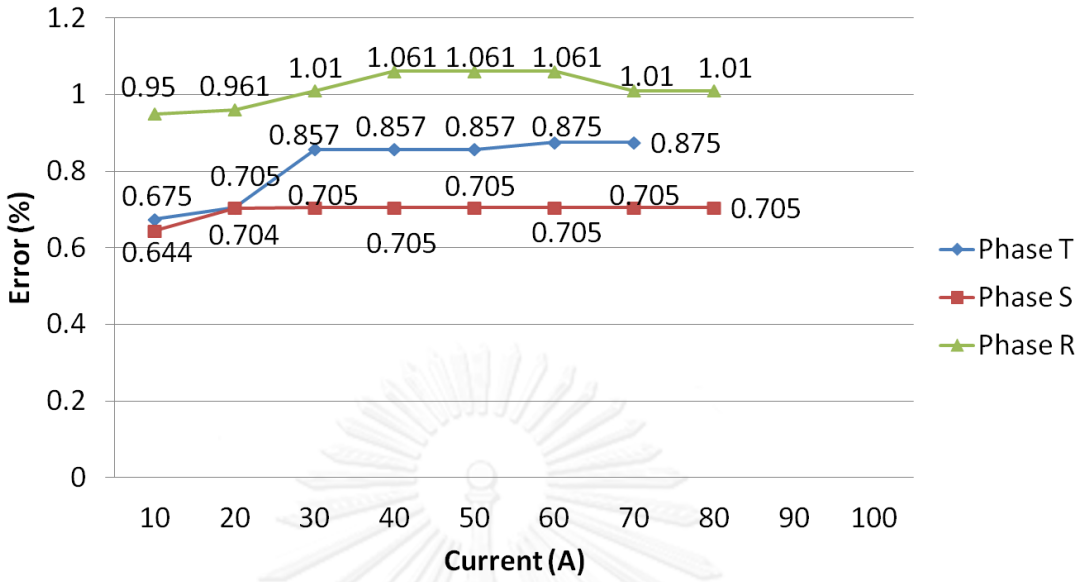
รูปที่ 5—11 กราฟค่าความผิดพลาดสูงสุดของพลังงานแอคทีฟช่วงกระแส $2 \leq I \leq 100$ ที่ PF = 0.5 Inductive

จากรูปที่ 5—11 ค่าความผิดพลาดสูงสุดของเฟส S และ T มีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้คือไม่เกิน ± 1.0 แต่เฟส R มีค่าความผิดพลาดสูงสุดเกินค่ามาตรฐานที่กำหนดดังรูป



รูปที่ 5—12 กราฟค่าความผิดพลาดสูงสุดของพลังงานแอคทีฟช่วงกระแส $2 \leq I < 10$ ที่ PF = 0.8 Capacitive

จากรูปที่ 5—12 ค่าความผิดพลาดสูงสุดของแต่ละเฟสมีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้คือไม่เกิน ± 1.0 ซึ่งแต่ล่ะเฟสมีค่าความผิดพลาดสูงสุดอยู่ในช่วงดังรูป



รูปที่ 5—13 กราฟค่าความผิดพลาดสูงสุดของพลังงานแอคทีฟช่วงกระแส $\mathbf{10 \leq I \leq 100}$ ที่ PF = 0.8 Capacitive

จากรูปที่ 5—13 ค่าความผิดพลาดสูงสุดของเฟส S และ T มีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้คือไม่เกิน ± 1.0 แต่เฟส R มีค่าความผิดพลาดสูงสุดเกินค่ามาตรฐานที่กำหนดดังรูป สรุปค่าผิดพลาดสูงสุดของเฟสต่างๆที่วัดได้ สรุปได้ดังตาราง 5—3

ตาราง 5—3 ค่าความผิดพลาดที่วัดได้สูงสุดแต่ละเฟสตามมาตรฐาน IEC

เงื่อนไขการวัด	Power Factor (PF)	Error (%) (Class1)	ค่าความผิดพลาดสูงสุดที่วัดได้ (%)		
			R	S	T
$0.5 \leq I < 1$	1	± 1.5	0.532	0.15	0.204
$1 \leq I \leq 9$	1	± 1	0.588	0.386	0.442
$10 \leq I \leq 80$	1	± 1	0.553	0.402	0.556
$1 \leq I < 2$	0.5 inductive	± 1.5	-1.267	-0.702	-0.683
	0.8 capacitive	± 1.5	0.873	0.581	0.523
$2 \leq I < 10$	0.5 inductive	± 1	-0.97	-0.507	-0.384
	0.8 capacitive	± 1	-1.235	-0.794	-0.646
$10 \leq I < 80$	0.5 inductive	± 1	0.995	0.659	0.675
	0.8 capacitive	± 1	1.061	0.705	0.875

5.2.2. **การคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้า**

5.2.2.1. **การหาค่า I_{rms} [1]**

สามารถคำนวณหา I_{rms} จากสมการได้ดังนี้

$$I_{rms} = \frac{(X_i)(V_{ref})}{(K_s.K_i.A_i.len_i.K_{int}.K_{int_comp}.Kdspi)}$$

ตัวแปรต่างๆแสดงดังต่อไปนี้

- x_i คือเป็นค่าที่อ่านจากรีจิสเตอร์กระแสที่แสดงเป็นตัวเลขฐานสิบ (Current Register Value expressed as decimal)
- V_{ref} แรงดันอ้างอิงภายใน (Internal voltage reference) มีค่าเป็น 1.23
- K_s คือค่าความไวในการตรวจจับกระแส (Current sensor sensitivity) มีค่าเป็น 0.1

จากการกำหนดบิตของความแม่นยำของมิเตอร์ (Precision meter : PM) ภายในไอซี STPMC1 ให้มีค่าเป็นหนึ่ง ฉะนั้นสูตรที่ใช้ในการคำนวณ Voltage and Current Channels Calibration คือ

- $K_i = (8192 - 1024 + 4CIX + CiX)/8192$ [2] โดยค่า CIX คือ การปรับวัดขนาดข้อมูลของช่องกระแสของทั้งสามเฟส (Calibration data for current channel of phase R, S ,T) สามารถปรับค่าได้แปดบิตภายในไอซี STPMC1 โดย CIX สามารถกำหนดเพื่อปรับค่า Ki จากที่ได้ทดลองนั้นกำหนดค่า CIX ดังนี้ คือ

CIR = 172 ดังนั้น K_i เฟสอาร์มีค่า (8192-1024+4(172)+0)/8192 = 0.95898

CIS = 177 ดังนั้น K_i เฟสเอสมีค่า (8192-1024+4(177)+0)/8192 = 0.96142

CIT = 156 ดังนั้น K_i เฟสทีมีค่า (8192-1024+4(156)+3)/8192 = 0.95153

- A_i คืออัตราการขยายของช่องกระแส (Current channel gain) มีค่า 16
- len_i คือค่าความยาวของรีจีสเตอร์กระแส (Current register length) มีค่า 65536
- K_{int} คืออัตราการขยายของวงจรอินทิเกรทเตอร์ที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์ มีค่า 0.815
- K_{int_comp} คือ Gain of decimation filter มีค่า 1.004
- K_{dspi} มีค่าเท่ากับ 0.6135 สำหรับหม้อแปลงกระแส

5.2.2.2. **การหาค่า U_{rms} [1]**

คำนวณหา I_{rms} จากสมการได้ดังนี้

$$U_{rms} = \frac{\left(1+\left({}^{R_1}/_{R_2}\right)\right)(X_u.V_{ref})}{(K_{ut}.K_u.A_u.len_u.K_{dspu}.K_{int_comp})}$$

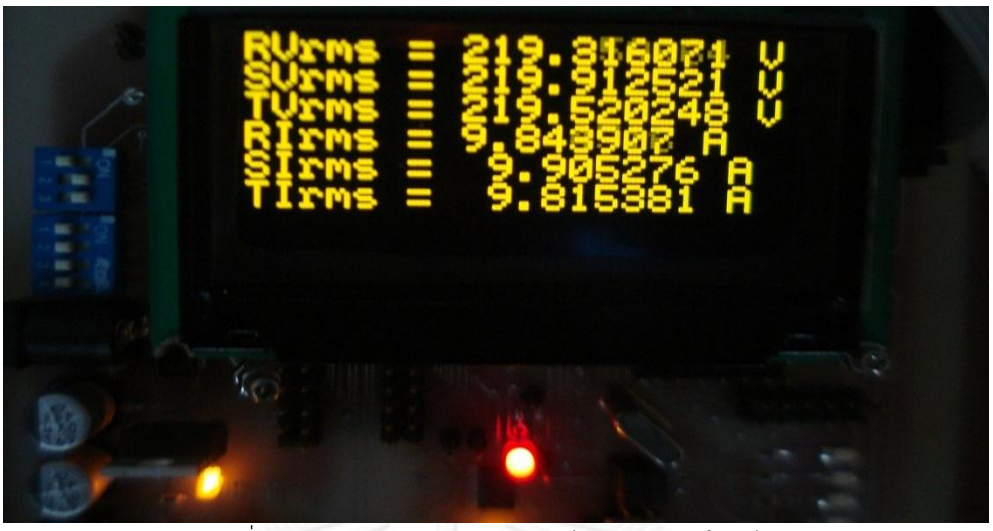
การหาค่าแรงดันไฟฟ้าคล้ายกับค่าของกระแสไฟฟ้า ค่าที่อ่านออกมานั้นมีค่าความคลาดเคลื่อน จึงมีการปรับตั้งค่าแรงดันไฟฟ้า (Voltage calibrator value , K_u) ให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านมีความแม่นยำมากที่สุด ค่า Ku ทั้งสามเฟสที่ปรับนั้นต้องไม่กระทบค่า Kp ของพลังงาน

บิต CUX สามารถกำหนดเพื่อปรับค่า Ku ทั้งสามเฟสโดยค่า CUX คือการปรับวัดขนาดข้อมูลของช่องแรงดันของทั้งสามเฟส (Calibration data for voltage channel of phase R, S ,T) สามารถปรับค่าได้ 8 บิตโดย CUX สามารถกำหนดเพื่อปรับค่า Ku จากสูตร $(8192 - 1024 + 4CUX + CvX)/8192$ [2] จากการทดลองกำหนดค่า CUX ได้ดังนี้ คือ

- CUR = 183 ดังนั้น K_u เฟสอาร์มีค่า (8192-1024+4(183)+2)/8192 =0.96459
- CUS = 179 ดังนั้น K_u เฟสเอสมีค่า (8192-1024+4(179)+2)/8192 = 0.96264
- CUT = 159 ดังนั้น K_u เฟสทีมีค่า (8192-1024+4(159)+0)/8192 = 0.95263
- x_u คือเป็นค่าที่อ่านจากรีจิสเตอร์แรงดันที่แสดงเป็นตัวเลขฐานสิบ (Voltage Register Value expressed as decimal)
- K_{ut} มีค่าเท่ากับ 2 สำหรับหม้อแปลงกระแส
- A_u คืออัตราการขยายของช่องแรงดัน (Voltage channel gain) มีค่า 2
- len_u คือค่าความยาวของรีจีสเตอร์แรงดัน (Current register length) มีค่าเป็น 4096
- K_{dspu} มีค่าเท่ากับ 0.5

หลังจากทำการปรับค่า K_i และ K_u แล้ว ทำการวัดค่า V_{rms} และ I_{rms} แล้วแสดงผลผ่านหน้าจอแอลซีดีได้ดังรูปที่ 5—14

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 5—14 วัดค่ากระแสสิบแอมแปร์ แรงดัน 220 โวลต์

การหาค่าพลังงานของบิตต่ำสุดของ Kp ซึ่งเป็นค่าคงที่มีหน่วยเป็น kW หาได้จากสมการ Kp = 1000/(C*2^{11}) ซึ่งค่า C คือจำนวนของพัลล์ต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง (Number of pulses per kWh) ที่กำหนดไว้มีค่า สำหรับ 15000SEM ที่ใช้ทดลองวัดเทียบกับมิเตอร์อ้างอิง

กรณีทดลองความต่างเฟสที่หกสิบองศาเพราะเป็นค่าที่กำลังเสมือนมีค่าสูงสุด ซึ่งค่าของพัลล์ต่อกิโลวัตต์ชั่วโมงมีค่าความผิดพลาดประมาณ +4% ดังนั้นจึงต้องมีการปรับค่าการชดเชยเฟส (Phase compensation) ในกรณีที่กำหนดค่า TSC บิต และ PM บิต ในตาราง 5—1 ข้างต้นนั้น สามารถหาค่าคงที่การชดเชย (Coefficient phase compensation , K_{phc}) ตามสมการได้ดังนี้

$$K_{phc} = - (32\ CpC[1:0] + 16\ CPC[0] + CPX[3:0]) \quad [2]$$

โดย CpC, CPC, และ CPX คือ CPR, CPS และ CPS คือกลุ่มของบิตที่ใช้ในการปรับค่าการวัดชดเชยเฟส ซึ่งอยู่ภายใน ไอซี STPMC1 ผลจากการคำนวณได้ค่าดังต่อไปนี้

K_{phc} เฟสอาร์= -(32(2) + 16(1) + 15) = -95

K_{phc} เฟสเอส= -(32(2) + 16(1) + 0) = -80

K_{phc} เฟสที= -(32(2) + 16(1) + 0) = -80

หาค่าการชดเชยเฟส (phase compensation , ϕ_{phc}) จากเงื่อนไขดังต่อไปนี้

PM = 1, TCS = 1, f_{line} = 50 Hz, HSA = 1 จะได้ว่า $\mathbf{f_{phc}}$ = 2.097 MHz

- HAS คือความเร็วสูงของสัญญาณนาฬิกาที่ STPMC1จ่ายให้ STPMS2
- f_{phc} สัญญาณนาฬิกาของการชดเชยเฟส

นำค่า K_{phc} ที่หาได้ของแต่ล่ะเฟสมาคำนวณหาค่าชดเชยเฟสในรูปแบบของอาศาได้ค่าดังนี้

เฟสอาร์ค่า $\phi_{phc} = K_{phc}.\left(\frac{360.f_{line}}{f_{phc}}\right) = -95.\left(\frac{360x50}{2.097*10^6}\right) = -0.8154$ องศา[2]

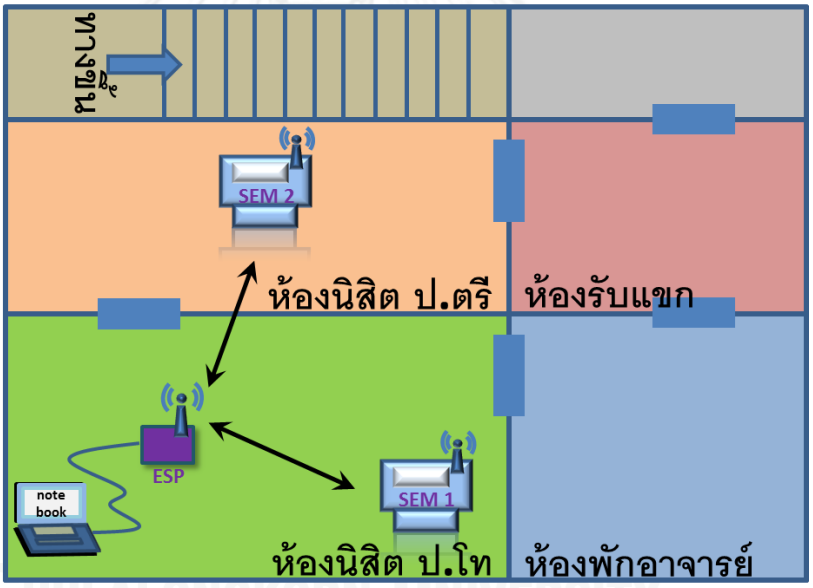
เฟสเอสค่า $\phi_{phc} = K_{phc}.\left(\frac{360.f_{line}}{f_{phc}}\right) = -80.\left(\frac{360x50}{2.097*10^6}\right) = -0.6867$ องศา

เฟสทีค่า $\phi_{phc} = K_{phc}.\left(\frac{360.f_{line}}{f_{phc}}\right) = -80.\left(\frac{360x50}{2.097*10^6}\right) = -0.6867$ องศา

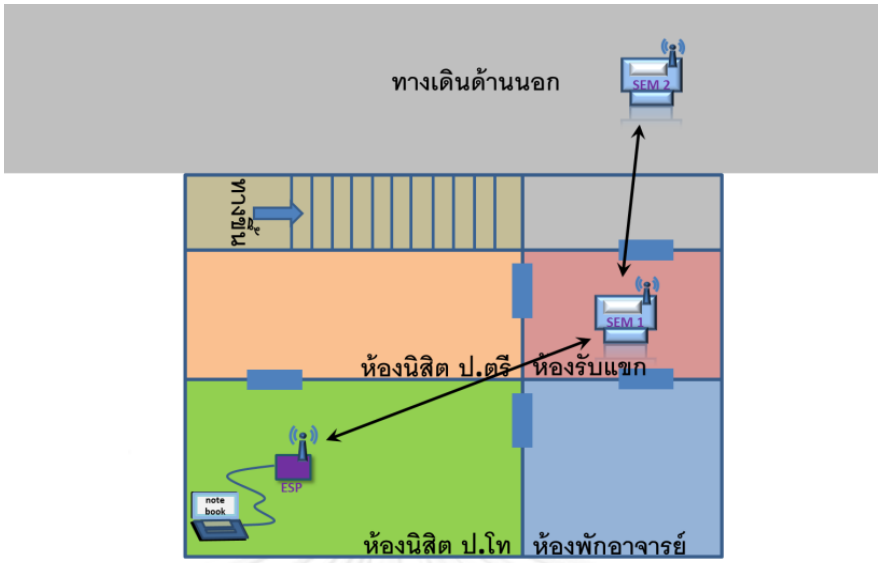
จากการทดลองพบว่าการใช้ Phase compensation ช่วยลดค่าความผิดพลาดความต่างเฟสที่หกสิบองศา ได้เกือบสี่เปอร์เซนต์ช่วยลดค่าความผิดพลาดของพัลล์ต่อกิโลวัตต์ชั่วโมงเข้าใกล้ศูนย์ได้มากที่สุด

5.3. ทดลองรับส่งข้อมูลจากมิเตอร์

จากการทดลองนั้นได้ทำการทดลองในการรับส่งข้อมูลจากมิเตอร์ได้จัดทำเครือข่ายสองรูปแบบด้วยกันคือแบบสตาร์ และแบบต้นไม้ ดังรูป โดยเครือข่ายที่ได้พัฒนาขึ้นนั้นประกอบด้วยคอมพิวเตอร์ที่เป็น DC 1 เครื่อง, ESP 1 ตัว และ SEM 2 เครื่อง มีรูปแบบการจัดว่างดังนี้



รูปที่ 5—15 รูปแบบโครงสร้างเครือข่ายแบบสตาร์



รูปที่ 5—16 รูปแบบโครงสร้างเครือข่ายแบบต้นไม้

จากรูปที่ 5—15 และรูปที่ 5—16 เป็นการแสดงรูปเครือของการรับส่งข้อมูลแบบอัตโนมัติ โดยทั้งสองรูปแบบที่จะเริ่มการสื่อสารสำหรับเครือข่าย smart energy meter เริ่มต้นด้วยการสร้างเครือข่ายโดยตัวประสานกลาง โดยให้มิเตอร์แต่ล่ะตัวเข้าร่วมเครือข่ายและตัวประสานกลางทำหน้าที่กำหนดโหนดไอดีของแต่ล่ะตัวเพื่อใช้ในการส่งหรือร้องขอข้อมูลแบบเฉพาะเจาะจง

เพื่อทดสอบการรับส่งข้อมูลว่าสามารถรับหรือส่งข้อมูลของระบบที่สร้างขึ้น เพื่อดูข้อมูลจากมิเตอร์สามารถแสดงการรับส่งของมูลได้ดังนี้

5.3.1. **คำสั่ง Get Profile**

เมื่อทำการล็อคอินเข้าระบบแล้วเริ่มกระบวนการตรวจรหัสมิเตอร์เพื่อทำการโหลดข้อมูลดังตาราง 5—4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง 5—4 กระบวนการตรวจรหัสมิเตอร์เพื่อทำการโหลดข้อมูล

เงื่อนไข	ข้อมูลที่ส่ง	อธิบาย
Com* to ESP	“Idmeter id meter”+ A5*	Command line
ESP* to Z1*	F0 01 00 01 02 A5	ตรวจสอบรหัสมิเตอร์
Send	“send 3A6F 10 10”	ส่งคำสั่งตรวจสอบรหัสมิเตอร์ไปยัง Z1
Z1 to M1*	A5	ตรวจสอบรหัสมิเตอร์
M1 to Z1*	Index(8 bit) DateTime(32 bit) energy(32 bit)*	LoadProfile

* หมายเหตุ Com คือ Computer, ESP คือ Energy Service Portal, Z1 คือ ZigBee1 และM1 คือ Meter1

จากตารางข้างต้นเป็นการโหลดข้อมูลจากมิเตอร์ตัวที่หนึ่งมาเก็บไว้ที่ ZigBee โดยการตรวจสอบรหัสของมิเตอร์ตัวที่ต้องการโหลด เมื่อโหลดข้อมูลเสร็จแล้วทำการรอคำสั่ง Get Profile ต่อไป

ตาราง 5—5 กระบวนการร้องขอข้อมูลด้วยคำสั่ง Get Profile

เงื่อนไข	ข้อมูลที่ส่ง	อธิบาย
Com to ESP	“zcl sm gp 00 00000000 0F”	Command line
Send	“send 3A6F 10 10”	Send command line
ESP to Z1	0702* 01 02 00 00 00000000 0F	คำสั่งโหลดโปรไฟต์
Send	“send 3A6F* 10 10”	ส่งคำสั่งโหลดโปรไฟต์
Z1 to ESP	0702 09 03 00 00000000 00 03 0F loadProfile	ตอบสนองกลับ
ESP to Com	Index(8 bit) DateTime(32 bit) energy(32 bit)	LoadProfile

* หมายเหตุ 3A6F คือโหนดไอดีของมิเตอร์ตัวที่หนึ่ง

5.3.2. **คำสั่ง Price**

ใช้เมื่อ SEM ต้องการทราบค่าไฟฟ้าจาก ESP เริ่มกระบวนการร้องขอโดยการกดปุ่มสวิทช์ที่ตัว SEM

ตาราง 5—6 เก็บราคาใน Buffer

เงื่อนไข	ข้อมูลที่ส่ง	อธิบาย
Com* to Co	“getprice price Price*”	Command line

* หมายเหตุ Price คือราคาที่ส่งไปเก็บใน Buffer เพื่อรอเรียกต่อไป

จากตาราง 5—6 เป็นการส่งค่าราคาไปเก็บใน Buffer 1 สำหรับมิเตอร์ 1 ล่วงหน้า นอกจากนี้เก็บค่าราคาใน Buffer 2 สำหรับมิเตอร์ 2 และ Buffer 3 สำหรับมิเตอร์ 3

Chulalongkorn University

ตาราง 5—7 ร้องขอราคาจาก Server

เงื่อนไข	ข้อมูลที่ส่ง	อธิบาย
M1 to Z1	Button kick mode price	Manual command
Z1 to ESP	“E001* 00 00 00 70*”	Request price
ESP to Z1	D001 00 01 00 Price*	Send price back
Z1 to M1	Price*	Send price via uart

* หมายเหตุ E001 คือคลัสเตอร์ราคาของ SEM1 ที่กำหนดขึ้นเอง, D001 คือคลัสเตอร์ตอบสนองราคาของ SEM1 ที่กำหนดขึ้นเอง และ Price คือราคาที่ส่งให้ SEM1

5.3.3. **คำสั่งทั่วไป**

ในโหมดนี้เป็นการเรียกดูค่าต่างๆของอุปกรณีการวัดว่าเป็นอย่างไร โดยทำการส่งคำสั่ง Read Attribute ไปยังโหนดที่ต้องการทราบค่าต่างๆ ดังนี้

ตาราง 5—8 คำสั่งเรียกดูสถานะของ SEM

เงื่อนไข	ข้อมูลที่ส่ง	อธิบาย
Com to Co	Zcl global read 1794 0200**	Read status meter
Send	“send 3A6F 10 10”	Send command line
Co to N1	0702* 00* 01 00** 0200**	คำสั่งโหลดโปรไฟต์
N1 to Co	08* 00	Receive status
Com to Co	Zcl global read 1794 0300**	Read Unit meter
Send	“send 3A6F 10 10”	Send command line
Co to N1	0702* 00* 02 00 0300	คำสั่งโหลดโปรไฟต์
N1 to Co	08* 00	Receive Unit
Com to Co	Zcl global read 1794* 0306**	Read device type meter
Send	“send 3A6F 10 10”	Send command line
Co to N1	0702* 00* 03 00 0306*	คำสั่งโหลดโปรไฟต์
N1 to Co	08* 00	Receive device type

* หมายเหตุ 0702 คือ simple metering cluster, 00 คือ general command type, 08 คือ แสดงทิศทางของการตอบสนองคำสั่งจากฝั่ง server ไปยัง client,

** หมายเหตุ 0200 คือ meter status attribute 00 คือ read attribute command, 0300 คือ unit of measure attribute และ 0306 คือ device type attribute

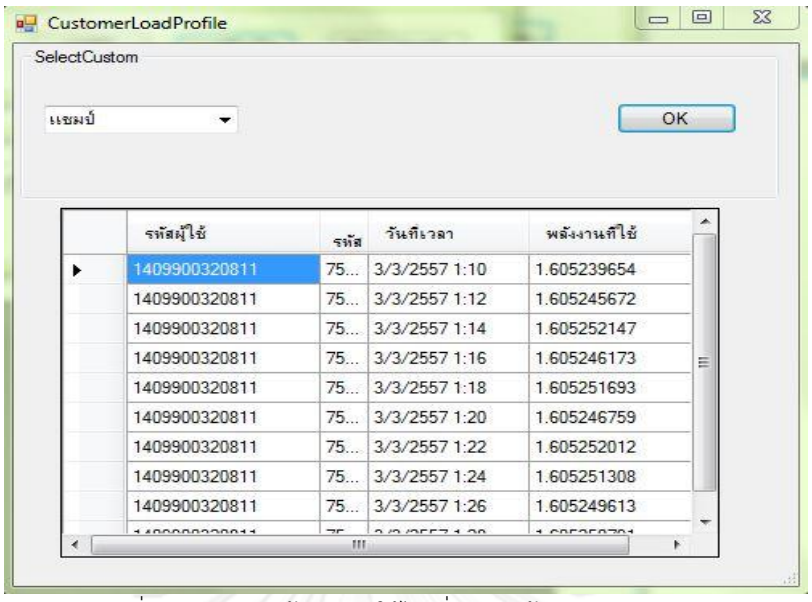
สรุป ในการรับส่งค่าต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นรูปแบบเครือข่ายไหนก็ตามทั้งแบบ สตาร์ และแบบต้นไม้รูปแบบคำสั่งในการสื่อสารใช้เหมือนกัน ซึ่งเหมือนในตารางทั้งหมดข้างต้น เพียงเปลี่ยนโหนดไอดีที่ต้องการจะสื่อสารในเครือข่ายโดยโพรโตคอลของ ZigBee จะจัดการสื่อสารให้อย่างอัตโนมัติ

5.4. **แสดงข้อมูลบนกราฟฟิกผู้ใช้ (Graphic User Interface: GUI)**

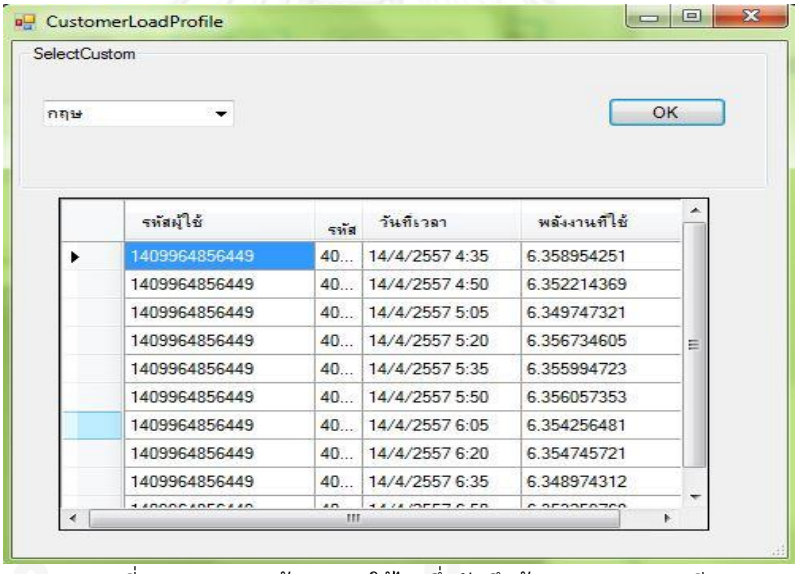
การแสดงผลข้อมูลบนกราฟฟิกผู้ใช้นั้น ได้ทำการแสดงข้อมูลเป็นสองรูปแบบคือ แสดงข้อมูลการใช้พลังงานของผู้ใช้ และแสดงลักษณะของ SEM

5.4.1. **แสดงข้อมูลการใช้พลังงานของผู้ใช้**

ทำการแสดงข้อมูลการใช้พลังงานของผู้ใช้ไฟ ซึ่งทำการบันทึกข้อมูลทุกๆ 2 นาที และ 15 นาที



รูปที่ 5—17 แสดงข้อมูลการใช้ไฟ ซึ่งบันทึกข้อมูลทุกๆ 2 นาที

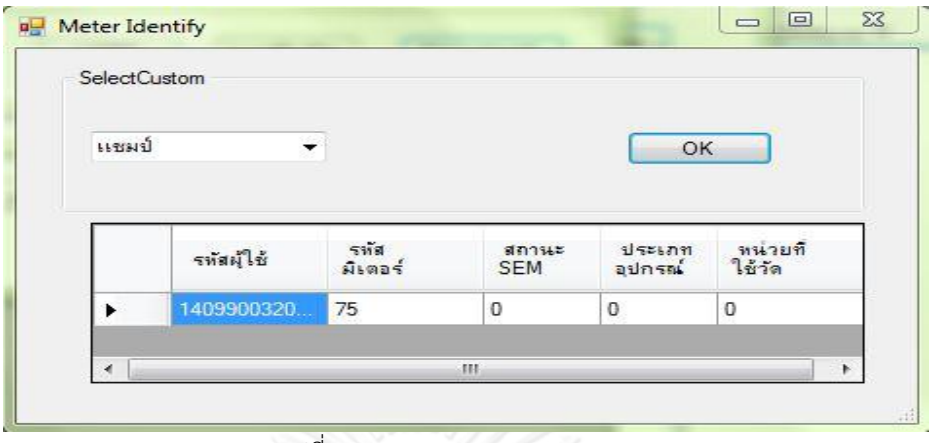


รูปที่ 5—18 แสดงข้อมูลการใช้ไฟ ซึ่งบันทึกข้อมูลทุกๆ 15 นาที

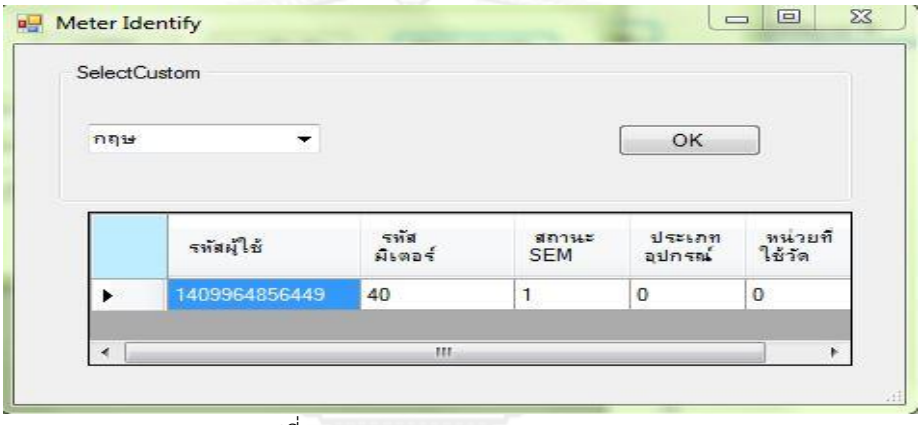
จากรูปที่ 5—17 และรูปที่ 5—18 แสดงข้อมูลผู้ไฟโดยทำการบันทึกการใช้ไฟทุกๆ 2 นาที และ 15 นาทีตามลำดับ ซึ้งข้อมูลพลังงานที่ส่งมานั้นอยู่ในรูปของ decimal เป็นค่าจากบิตใน ริจิสเตอร์พลังงาน โดยค่าบิตต่ำสุดมีค่าเท่ากับ kp = 3.2552×10^{-5} Wh เมื่อนำมาคูณค่าข้อมูลพลังงานที่ส่งมาทำให้ได้พลังงานในหน่วย Watt-hours (Wh) ก่อนที่จะนำไปคำนวณค่าไฟต่อไป

5.4.2. **แสดงคุณลักษณะของ SEM**

จากรูปที่ 5—19 และ รูปที่ 5—20 ทำการแสดงลักษณะของ SEM มีส่วนประกอบดังต่อไปนี้



รูปที่ 5—19 แสดงสถานะของ SEM1



รูปที่ 5—20 แสดงสถานะของ SEM2

- สถานะ SEM แสดงให้ทราบว่ามิเตอร์ตัวนั้นพร้อมใช้งานหรือไม่ แสดงค่าเป็น 0 แสดงว่าพร้อมใช้งาน ถ้าแสดงค่าเป็น 1 ไม่พร้อมใช้งาน
- ประเภทของอุปกรณ์ แสดงให้ทราบว่าอุปกรณ์วัดตัวนั้นๆเป็นอุปกรณ์วัดอะไร เช่น แสดงค่าเป็น 0 เป็นมิเตอร์วัดไฟ, แสดงค่าเป็น 1 เป็นมิเตอร์วัดแก๊ส, แสดงค่าเป็น 2 เป็นมิเตอร์วัดน้ำ เป็นต้น
- หน่วยที่ใช้วัด แสดงให้ทราบว่าอุปกรณ์วัดตัวนั้นๆวัดค่าเหล่านั้นออกมาเป็นหน่วยอะไร เช่น แสดงค่าเป็น 0 หน่วยเป็น kW และ kWh, แสดงค่าเป็น 1 หน่วยเป็น Cubic Meter (m^3) และ Cubic Meter per Hour (m^3/h) , แสดงค่าเป็น 2 หน่วยเป็น Cubic feet (ft^3) และ Cubic feet per Hour (ft^3/h) เป็นต้น

จากการทดลองวัดความแม่นของ SEM เทียบกับมาตรฐาน IEC พบว่าที่เฟสอาร์ค่าความผิดพลาดเกินมาตราฐานที่กำหนดไว้จากตาราง 5—3 เงื่อนไขทดสอบกระแสที่ $2 \leq I < 10$ และ PF. เท่ากับ 0.8 capacitive มีค่าความผิดพลาดสูงสุดคือ -1.235 เปอร์เซ็นต์ และเงื่อนไขทดสอบกระแสที่ $10 \leq I < 80$ และ PF. เท่ากับ 0.8 capacitive มีค่าความผิดพลาดสูงสุดคือ 1.061เปอร์เซนต์

การทดสอบการรับส่งข้อมูลนั้นเป็นการรับส่งข้อมูลในระยะที่สามารถจัดวางเป็นโทโปโลจีต่างๆในที่นี้คือ แบบสตาร์ และแบบต้นไม้ โดยการสื่อสารนั้นเพียงกำหนดรหัสของโหนดปลายทางที่จะส่งทางโพรโตคอล ZigBee จะทำการจัดการการส่งให้โดยอัตโนมัติ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1. สรุปผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ มีเนื้อหารายละเอียดเกี่ยวกับการพัฒนาระบบอ่านมิเตอร์แบบอัตโนมัติ โดยติดต่อผ่านคลื่นวิทยุโพรโทคอล ZigBee เป็นการติดต่อกันระหว่างมิเตอร์ในเครือข่าย และ Energy Service Portal (ESP) โดยโครงสร้างการติดต่อเป็นแบบดาว และแบบต้นไม้ ซึ่งข้อมูลการใช้ไฟฟ้านั้นจะทำการบันทึกทุกๆ 15 นาที แล้วส่งผ่านข้อมูลการใช้ไฟฟ้าในแต่ละวันของมิเตอร์ผู้ใช้ในเครือข่ายมายังโมดูล ZigBee ที่เป็น ESP ก่อนจะจัดเก็บข้อมูลลงในฐานข้อมูลต่อไป

โครงสร้างระบบเครือข่ายการสื่อสารมิเตอร์แบบอัตโนมัตินี้มีส่วนประกอบทางฮาร์ดแวร์ 2 ส่วนที่สำคัญ คือส่วนที่เป็นมิเตอร์ และส่วนที่เป็นเครือข่ายการสื่อสาร ซึ่งส่วนของมิเตอร์ยังแบ่งได้เป็นสองส่วนหลัก คือส่วนที่เป็นการควบคุมการจัดการระบบทั้งหมดของมิเตอร์ และส่วนที่ทำหน้าที่คำนวณปริมาณทางไฟฟ้า ส่วนการควบคุมการจัดการระบบทั้งหมดของมิเตอร์ใช้ไอซีประมวลผล STM32L152VBT6 มีที่หน้าหลักในการเชื่อมการติดต่อในส่วนต่างๆ และจัดการระบบมิเตอร์แบบอัตโนมัติ รวมไปถึงการเก็บข้อมูลก่อนส่งไปเก็บยัง Data Flash และส่วนที่คำนวณปริมาณทางไฟฟ้าเลือกใช้ไอซี STPMC1 และ STPMS2 ซึ่ง STPMC1 ทำหน้าที่คำนวณพลังงานทางไฟฟ้าแล้วเก็บลงในรีจิสเตอร์เพื่อรอหน่วยประมวลผลกลางอ่านข้อมูลออกไปใช้ต่อไป ส่วนSTPMS2 ทำหน้าที่แปลงสัญญาณกระแสและแรงดัน โดยแปลงจากสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (ADC) แล้วส่งไปยัง STPMC1 เพื่อนำไปคำนวณต่อไป

ส่วนที่เป็นเครือข่ายการติดต่อสื่อสาร ใช้ไอซีประมวลผล STM32W108 ทำหน้าที่จัดการรับส่งข้อมูลผ่านชุดโพรโปรโตคอล ZigBee และจัดการติดต่อกับมิเตอร์ผ่าน UART ในการทดลองเป็นการทดสอบการวัดมิเตอร์วัดพลังงานที่ได้พัฒนาขึ้น โดยได้ทดสอบวัดพลังงานที่ 220 โวลต์ โดยมีกระแสสูงสุดที่ 80 แอมป์ เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ค่าความผิดพลาดจากการทดลองสรุปได้ว่าเฟสอาร์มีค่าความผิดพลาดสูงสุดเกินมาตรฐานที่กำหนด คือที่เงื่อนไข $2 \leq I < 10$ ที่ 0.8 capacitiveและ$10 \leq I < 80$ ที่ 0.8 capacitive ส่วนเฟสเอส และ เฟสทีมีค่าความผิดพลาดสูงสุดตามเงื่อนไขจากตาราง 5—3

ในส่วนการทดลองการสื่อสารทดสอบการสื่อสารด้วยโครงสร้างแบบดาว และโครงข่ายแบบต้นไม้ โดยเครือข่ายประกอบด้วย โมดูล ZigBee ที่เป็น ESP 1 ตัว และ SEM 2 ตัว โดยเมื่อเริ่มทำงานของระบบให้ตัว ESP ทำการสร้างเครือข่ายแล้วให้ SEM 2 ตัว เข้าร่วมเครือข่ายแล้วทำการจัดวางตัว SEM ในตำแหน่งให้เป็นไปตามการสื่อสารแบบโทโปโลจีต่างๆ คือ โครงข่ายแบบดาว และ

โครงข่ายแบบต้นไม้ ผู้ใช้สามารถสั่งเรียกดูข้อมูลโดยเลือกติดต่อกับ SEM ตัวใดตัวหนึ่งได้ โดยเริ่มส่งคำสั่งตรวจสอบรหัสมิเตอร์เพื่อให้เกิดการโหลดข้อมูลจากมิเตอร์มาเก็บไว้ที่โมดูล ZigBee เพื่อรอคำสั่ง Get Profile เพื่อโหลดข้อมูลออกต่อไป ภายในเครือข่ายข้อมูลที่ได้รับนั้นสามารถแสดงในส่วนบนกราฟิกผู้ใช้งาน โดยแสดงค่าพลังงานไฟฟ้า และค่าไฟฟ้าของมิเตอร์แต่ละตัวในระบบ และระบบฐานข้อมูลทั้งหมดของผู้ใช้บริการ

6.2. **ข้อเสนอแนะ**

- ควรมีไฟสำรองเมื่อเวลาเกิดไฟดับเพื่อรักษาสถานการณ์เชื่อมต่อมอดูล ZigBee ที่มิเตอร์เพื่อให้เครือข่ายยังคงใช้งานได้ต่อไป Zigbee สามารถซ่อมตัวเองได้ในกรณีใช้ไฟจากถ่านขนาด AAA
- โมดูลเวลาที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลในไอซีประมวลผลยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง ควรเพิ่มประสิทธิภาพทาง มอดูล RTC ให้มีความแม่นยำขึ้น ระดับที่เทียบเท่าเวลามาตรฐานโลก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รายการอ้างอิง

1. STMicroelectronics. *SPI protocol for the STPMC1 metering device*. November 2010; Available from: http://www.st.com/web/en/search/partNumberKeyword.
2. STMicroelectronics. *STPMC1 Programmable poly-phase energy calculator IC*. May 2010; Available from: http://www.st.com/web/en/home.html.
3. 802, I.S., *Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs).* October 2003.
4. Alliance, Z. *ZIGBEE CLUSTER LIBRARY SPECIFICATION*. May 2012; Available from: http://www.zigbee.org/Standards/Overview.aspx.
5. Alliance, Z. *ZIGBEE SMART ENERGY PROFILE SPECIFICATION*. December 2008; Available from: http://www.zigbee.org/Standards/Overview.aspx.
6. NXP. *An Introduction to Smart Energy White Paper*. December 2009; Available from: http://www.nxp.com.
7. NXP. *ZigBee PRO Smart Energy API User Guide*. January 2013; Available from: http://www.nxp.com.
8. Prapasawad, C., K. Pornprasitpol, and W. Pora. *Development of an automatic meter reading system based on ZigBee PRO Smart Energy Profile IEEE 802.15.4 standard*. in *Electron Devices and Solid State Circuit (EDSSC), 2012 IEEE International Conference on*. 2012.
9. STMicroelectronics. *STM32L152xx, Ultralow power ARM-based 32-bit MCU with up to 128 KB Flash, RTC, LCD, USB, USART, I2C, SPI, timers, ADC, DAC, comparators*. April 2010; Available from: http://www.st.com.
10. STMicroelectronics. *STPMS1, Dual-channel 1-bit, 2 MHz, 1 order sigma-delta modulator with embedded PGA*. October 2010 Available from: http://www.st.com.
11. STMicroelectronics. *STEVAL-IPE010V1 poly-phase demonstration kit for the STPMC1 and STPMS1*. April 2010; Available from: http://www.st.com/web/en/search/partNumberKeyword.
12. STMicroelectronics. *STPMS2, Smart sensor II dual-channel 1-bit, 4 MHz, second-order sigma-delta modulator with embedded PGLNA*. October 2011; Available from: http://www.st.com.
13. Shang-Wen, L., et al. *Development of a smart power meter for AMI based on ZigBee communication*. in *Power Electronics and Drive Systems, 2009. PEDS 2009. International Conference on*. 2009.

14. เอี่ยมสิริวงศ์, ระบบฐานข้อมูล *Database Systers*. 2551: SE-EDUCATION PUBLIC COMPANY LIMITED.

15. (IEC), I.E.C. *Electricity metering equipment (AC) – General requirements, tests and test conditions* 2003; First edition:[Available from: http://webstore.iec.ch.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายแชมป์ ประภาสวัสดิ์ เกิดเมื่อวันที่ 1 มิถุนายน พ.ศ. 2530 ที่จังหวัดขอนแก่น สำเร็จการศึกษาหลักสูตรหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปีการศึกษา 2553 ต่อมาได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า แขนงวิชาการออกแบบและประยุกต์วงจรรวม ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2553

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University