



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า

วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การประเมินค่าประสิทธิภาพการส่งผ่านข้อมูลของระบบสื่อสาร PLC สำหรับระบบ
สมาร์ตกริดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

Data Traffic Efficiency Evaluation of Power Line Communication for PEA's Smart Grid

นามผู้วิจัย นายกิตติวัฒน์ ศรีวิลาส

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วัชร จงบุรี, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์วิชัย สุระพัฒน์, วศ.ม.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สิงสีทจี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การประเมินค่าประสิทธิภาพการส่งผ่านข้อมูลของระบบสื่อสาร PLC สำหรับระบบสมาร์ตกริดของ
การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

Data Traffic Efficiency Evaluation of Power Line Communication for PEA's Smart Grid

โดย

นายกิตติวัฒน์ ศรีวิลาส

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)
พ.ศ. 2556

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติวัฒน์ ศรีวิลาส 2556: การประเมินค่าประสิทธิภาพการส่งผ่านข้อมูลของระบบสื่อสาร PLC สำหรับระบบสมรรถนะการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชะรินทร์ จงบุรี, Ph.D. 72 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษาศักยภาพในการนำเทคโนโลยีระบบสื่อสาร PLC ย่านความถี่ปานกลาง มาใช้กับโครงข่ายระบบสื่อสารปลายทาง (Last Mile Network) สำหรับระบบโครงข่ายไฟฟ้าสมรรถนะการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) โดยใช้จำนวนสมรรถนะที่สูงสุดที่ระบบสามารถรองรับได้โดยไม่เกิดภาวะคับคั่งของช่องสัญญาณเป็นเกณฑ์ชี้วัด พร้อมทั้งคำนวณหาค่าทรูพุต ระหว่างสมรรถนะกับอุปกรณ์ DCU ในสถานะต่างๆ ในงานวิจัยนี้สร้างแบบจำลองการส่งข้อมูลในสถานการณ์ต่างๆ เพื่อวิเคราะห์สถานะคับคั่งของช่องสัญญาณ (Congestion Model) ในการจำลองใช้ข้อกำหนดตามมาตรฐาน PRIME ซึ่งมีรูปแบบการเข้าใช้ช่องสัญญาณแบบ CSMA/CA ร่วมกับ TDM โปรแกรมแบบจำลองสามารถปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ จำนวนสมรรถนะในระบบ ความถี่ในการส่งข้อมูลจากสมรรถนะ ค่าอัตราเร็วข้อมูล ขนาดของแพ็กเก็ตข้อมูลในการส่ง

ผลการจำลองได้นำเสนอการเปรียบเทียบจำนวนสมรรถนะที่สูงสุดใน 3 สถานการณ์ คือ การส่งข้อมูล Load Profiles แบบรายคาบเพียงอย่างเดียวด้วยวิธี CSMA/CA การส่งข้อมูล Load Profiles แบบรายคาบด้วยวิธี CSMA/CA ร่วมกับส่งข้อมูลของสมรรถนะที่แอพพลิเคชันด้วยวิธี CSMA/CA และการส่งข้อมูลด้วยเทคนิควิธีแผนการส่งข้อมูลแบบจัดเวลา (Scheduling Scheme) โดยเป็นการส่งข้อมูล Load Profiles แบบรายคาบด้วยวิธี TDM ร่วมกับส่งข้อมูลของสมรรถนะที่แอพพลิเคชันแบบ CSMA/CA ผลการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าเทคนิควิธีการส่งข้อมูลแบบ Scheduling Scheme นั้นสามารถเพิ่มจำนวนสมรรถนะที่สูงสุดในระบบได้สูงขึ้น กฟภ. สามารถนำผลลัพธ์ของการจำลองนี้ ไปใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบระบบสมรรถนะการไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Kittiwat Srivilas 2013: Data Traffic Efficiency Evaluation of Power Line
Communication for PEA's Smart Grid. Master of Engineering (Electrical Engineering),
Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering. Thesis
Advisor: Assistant Professor Wachira Chongburee, Ph.D. 72 pages.

This paper evaluate the capability and suitability of narrow band Powerline Communications (PLC) for last mile network in PEA's smart grid system. The measure of PLC capability in this study is the maximum number of smart meters that the network can handle and system throughput in a given congestion scenario. This paper creates a simulation program for data traffic and congestion analysis (Congestion Model). The simulation assumes that the PLC protocol is PRIME (Powerline Intelligent Metering Evolution) standard which adopts both Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA) and Time Division Multiplex (TDM) schemes as the media access technique. The performance analytical model takes into account the effects of the number of smart meters, rate of sending message, data rate, the data packet size.

The simulation compare the number of smart meters that the network can handle as well as the throughput in 3 different scenarios, simulate periodic load profiles data traffic using CSMA/CA, simulate periodic load profiles and random access smart grid applications using CSMA/CA, and simulate data traffic by using Scheduling Scheme technique that use TDM for load profiles to avoid collision. The simulation result shows that it can improve the system performance of the network to accommodate more smart meters by using Scheduling Scheme technique. This simulation program can be used as one of the PEA smart grid design tool.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.วชิระ จงบุรี ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง ในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

ขอกราบขอบพระคุณการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่ได้ให้ทุนสนับสนุน การศึกษาระดับปริญญาโท ตามโครงการความร่วมมือทางวิชาการและพัฒนาผู้เชี่ยวชาญสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ระหว่าง กฟภ. และมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในครั้งนี้

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่คุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้อบรมและให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง

กิตติวัฒน์ ศรีวิลาศ

เมษายน 2556

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	5
การตรวจเอกสาร	6
อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	39
อุปกรณ์	39
วิธีการทดลอง	40
ผลการทดลองและวิจารณ์	46
ผลการทดลอง	46
วิจารณ์	65
สรุปและข้อเสนอแนะ	66
สรุป	66
ข้อเสนอแนะ	68
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	69
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	72

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ชนิดและลักษณะของข้อมูล สำหรับเหตุการณ์และแอปพลิเคชันต่างๆ ของ สมาร์ตกริด	23
2	ผลการจำลองการส่งข้อมูล Load Profiles แบบรายคาบด้วยวิธี CSMA/CA	46
3	ผลการจำลองการส่งข้อมูล Load Profiles แบบรายคาบร่วมกับส่งข้อมูลสมาร์ต กริดแอปพลิเคชันแบบสุ่ม ด้วยวิธี CSMA/CA – ค่าทูลูตต่อจำนวนสมาร์ตมิเตอร์	48
4	ผลการจำลองการส่งข้อมูล Load Profiles แบบรายคาบร่วมกับส่งข้อมูลสมาร์ต กริดแอปพลิเคชันแบบสุ่ม ด้วยวิธี CSMA/CA - เปอร์เซนต์การส่งข้อมูลซ้ำของ Load Profiles	51
5	ผลการจำลองการปรับปรุงประสิทธิภาพการส่งข้อมูล ด้วยเทคนิควิธี Scheduling Scheme	55
6	ผลการจำลองการส่งข้อมูล Load Profiles แบบรายคาบ ร่วมกับส่งข้อมูลสมาร์ต กริดแอปพลิเคชันแบบสุ่ม ด้วยวิธี CSMA/CA – ค่าทูลูตต่อจำนวนสมาร์ตมิเตอร์	58
7	ผลการจำลองการส่งข้อมูล ด้วยเทคนิควิธี Scheduling Scheme – ค่าทูลูตต่อ จำนวนสมาร์ตมิเตอร์	61

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	โครงสร้างพื้นฐานระบบสื่อสารของ กฟภ.	2
2	โครงสร้างระบบเครือข่ายมาตรฐาน PRIME แบบ Tree Topology	10
3	การจัดสรรช่องสัญญาณระหว่าง SCP และ CFP	12
4	โครงสร้างของเฟรมข้อมูล Generic MAC PDU	13
5	การเข้าใช้ช่องสัญญาณแบบ CSMA/CA	14
6	Flow Diagram ขั้นตอนการเข้าใช้ช่องสัญญาณแบบ CSMA/CA	16
7	การเกิดตัวแปรสุ่มแบบไม่ต่อเนื่องของกระบวนการบิวของ	17
8	กระบวนการบิวของที่นิยามจากช่วงเวลาการเรียกใช้งาน	18
9	ความสัมพันธ์ระหว่างภาระการส่งผ่านข้อมูลกับค่าทรูพุต	20
10	โครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายระบบไฟฟ้า	25
11	การทำ Quantification สำหรับโครงข่ายระบบไฟฟ้า	26
12	โครงสร้างของบริการ KT Smart Green Service	28
13	การใช้งานของระบบ ENIS	34
14	การเชื่อมต่อระหว่างสมาร์ทมิเตอร์กับ DCU แบบ One-to-Many	41
15	การสุ่มค่า ความต้องการส่งข้อมูลของแต่ละ Node	41
16	ช่วงเวลา Node ใช้ในการส่งข้อมูล	42
17	ผลลัพธ์ของการส่งข้อมูลของทุก Node ในระบบ	42
18	Flowchart ขั้นตอนการประมวลผลของแบบจำลอง	43
19	การส่งข้อมูลของสมาร์ทมิเตอร์แบบ Scheduling Scheme	45
20	ค่าทรูพุตต่อจำนวนสมาร์ทมิเตอร์ของการส่งข้อมูล Load Profiles แบบรายคาบ แบบ CSMA/CA	47
21	ค่าทรูพุตต่อจำนวนสมาร์ทมิเตอร์ ส่ง Load Profiles แบบรายคาบ ร่วมกับข้อมูล สมาร์ทกริดแอปพลิเคชันแบบสุ่ม ด้วยวิธี CSMA/CA	53
22	เปอร์เซ็นต์การส่งข้อมูล Load Profiles ขึ้น ต่อจำนวนสมาร์ทมิเตอร์ในระบบ	54
23	ค่าทรูพุตต่อจำนวนสมาร์ทมิเตอร์ ของการส่งข้อมูลแบบ Scheduling Scheme	57

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
24	ค่าทราฟฟิคต่อสมาชิเตอร์ กับจำนวนสมาชิเตอร์ของการส่งข้อมูล Load Profiles แบบรายคาบ ร่วมกับข้อมูลสมาชิตริดแอพพลิเคชันแบบสุ่ม ด้วยวิธี CSMA/CA	61
25	ค่าทราฟฟิคต่อสมาชิเตอร์ กับจำนวนสมาชิเตอร์ ของการส่งข้อมูลแบบ Scheduling Scheme	64

การประเมินค่าประสิทธิภาพการส่งผ่านข้อมูลของระบบสื่อสาร PLC สำหรับระบบ สมาร์ตกริดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

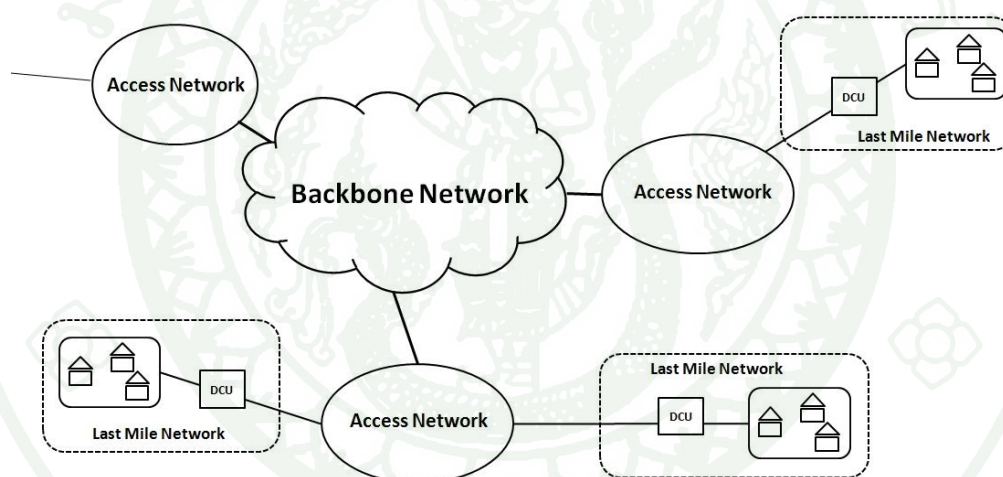
Data Traffic Efficiency Evaluation of Power Line Communication for PEA's Smart Grid

คำนำ

สมาร์ตกริดเป็นระบบโครงข่ายไฟฟ้า ที่ใช้ประโยชน์จากระบบเทคโนโลยีสารสนเทศและระบบสื่อสาร ผนวกเข้ามาช่วยบริหารจัดการ ระบบการส่งจ่ายและให้บริการพลังงานไฟฟ้าอย่างชาญฉลาด ทำให้การจัดสรรพลังงานไฟฟ้า ระหว่างผู้ให้บริการ และผู้บริโภคเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ยังสามารถรองรับและส่งเสริมการใช้พลังงานสะอาดได้เป็นอย่างดี มีศักยภาพทางด้านความปลอดภัย ช่วยสร้างเสถียรภาพของโครงข่ายระบบส่งไฟฟ้า รวมถึงช่วยลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานได้อย่างมาก การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค หรือ กฟภ. (Provincial Electricity Authority ด้วยย่อ PEA) เป็นหน่วยงานรัฐวิสาหกิจ มีหน้าที่ให้บริการจำหน่ายไฟฟ้าแก่ประชาชน มีความพร้อมที่จะพัฒนาระบบโครงข่ายไฟฟ้าเดิม ให้เป็นโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะสมาร์ตกริด โดยปัจจุบันได้ประกาศนโยบาย และเปิดตัวโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ หรือ PEA Smart Grid โดยมีการจัดทำแผนพัฒนาระบบโครงข่ายไฟฟ้าสมาร์ตกริด ด้วยการวางรากฐานเทคโนโลยีต่าง ๆ เพื่อนำไปสู่การบูรณาการสมาร์ตกริด มีการจัดทำแผนที่นำทาง (Roadmap) ศึกษาความเหมาะสมของโครงการต่างๆ เพื่อให้ฟังก์ชันการใช้งานต่างๆ อันได้แก่ ระบบควบคุมสั่งการจ่ายไฟอัตโนมัติ (SCADA) ระบบเทคโนโลยีสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ (GIS) ระบบคอมพิวเตอร์ซอฟต์แวร์สำเร็จรูป (SAP) ระบบศูนย์บริการข้อมูลทางโทรศัพท์ (PEA Call Center 1129) และระบบมิเตอร์อ่านหน่วยไฟฟ้าอัตโนมัติ (AMR) ซึ่งจะพัฒนาเป็นระบบมิเตอร์ไฟฟ้าอัจฉริยะ (AMI) ของสมาร์ตกริด ให้ สามารถใช้งานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

สมาร์ตกริดเป็นการหลอมรวมกันของเทคโนโลยีสื่อสารข้อมูลและการปฏิบัติงาน เข้ากับโครงสร้างโครงข่ายทางระบบไฟฟ้า เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพ ความเชื่อถือได้ ความมั่นคงปลอดภัย และสร้างทางเลือกให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าและหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง กฟภ. เป็นหน่วยงานที่มีโครงข่ายระบบสื่อสารขนาดใหญ่ครอบคลุมทั่วประเทศ (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553) โดยมีโครงข่ายใยแก้วนำแสง เป็นเครือข่ายแบ็คโบน (Backbone Network) และมีการใช้เทคโนโลยีไว้

สายเช่น ระบบสื่อสารวิทยุ จีพีอาร์เอส (GPRS) และระบบสื่อสาร PLC (Power Line Communication) ในส่วนของการกระจายเครือข่าย และแอคเซสโนด (Access Node) เพื่อสนับสนุนงานด้านต่างๆ โครงข่ายสื่อสารที่จะต้องเตรียมรองรับสมาร์ตกริดในอนาคตนั้น มีความสำคัญมากต่อการทำงานที่มั่นคงปลอดภัยและเชื่อถือได้ ของโครงสร้างการทำงานของระบบไฟฟ้า ต้องมีความพร้อม ในการรองรับแอปพลิเคชัน (Application) และการใช้งานที่ครอบคลุมหลากหลาย อันได้แก่ ระบบป้องกันและรีเลย์ (Protective Relay) ระบบควบคุมสั่งการจ่ายไฟอัตโนมัติ ระบบสื่อสารในรูปแบบเสียง ข้อมูลและภาพ ให้กับเจ้าหน้าที่ที่ออกปฏิบัติการ ระบบสายส่งฟีดเดอร์อัตโนมัติ (Distribution Feeder Automation) และระบบทางด้านความปลอดภัย ต่างๆ เป็นต้น สามารถแสดงโครงสร้างพื้นฐานระบบสื่อสารของ กฟภ. ได้ดังภาพที่ 1 โดยในส่วนของโครงข่ายระบบสื่อสารปลายทาง หรือ Last Mile Network นั้น กฟภ. กำลังศึกษาพิจารณาเทคโนโลยีระบบสื่อสารต่างๆ เพื่อนำมาใช้งาน



ภาพที่ 1 โครงสร้างพื้นฐานระบบสื่อสารของ กฟภ.

ลักษณะโครงสร้างของโครงข่ายสื่อสารสำหรับสมาร์ตกริด โดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยโครงข่ายแบ็คโบน ที่รองรับแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ขนาดใหญ่ ใช้เชื่อมต่อข้อมูลจากภูมิภาคต่างๆ เข้ามายังศูนย์กลาง และส่วนของโครงข่ายในระดับแอคเซส ซึ่งมีลักษณะเป็นแอคเซสริง (Access Ring) หรือสาขาย่อย ที่มีแบนด์วิดท์ต่ำลงมาเพื่อเชื่อมต่อข้อมูลจากพื้นที่เข้ามายังโครงข่ายแบ็คโบน เทคโนโลยีที่มักนำมาใช้ในโครงข่ายแบ็คโบน ได้แก่ เทคโนโลยีระบบสื่อสารผ่านใยแก้วนำแสง และ เทคโนโลยีดิจิทัลไมโครเวฟเรดิโอ (Digital Microwave Radio) ส่วนเทคโนโลยีในส่วนแอคเซส มักจะเป็นการผสมผสานกันของหลายเทคโนโลยี เช่น ระบบสื่อสารผ่านสายทองแดง (Twisted

Pair) ระบบสื่อสาร PLC ระบบวิทยุย่าน VHF/UHF และเทคโนโลยีไร้สายต่างๆ เช่น เครือข่ายไวไฟ (Mesh Wi-Fi) ไวแมกซ์ (WiMAX) ซิกบี (Zigbee) หรือ เทคโนโลยี 3G เป็นต้น โครงข่ายระบบสื่อสารปลายทาง เป็นโครงข่ายที่ใช้ในการเชื่อมต่ออุปกรณ์มีเตอร์ ที่กระจายอยู่ ณ สถานที่ใช้ไฟหรือผู้ใช้ปลายทาง เข้ามายังโครงข่ายในส่วนที่เป็นเครือข่ายระดับแอคเซส (Access Network) เพื่อการบริหารจัดการข้อมูล ที่เกี่ยวกับระบบมิเตอร์อ่านหน่วยไฟฟ้าอัตโนมัติ หรืองานในระบบสารสนเทศอื่นๆ การเชื่อมต่องดดังกล่าวนี้ประกอบไปด้วยสองส่วนด้วยกัน คือการเชื่อมต่อจากสมาร์ตมิเตอร์มายังอุปกรณ์ ดีซียู (Data Concentrator Unit :DCU) และการเชื่อมต่อจากอุปกรณ์ดีซียูมายังโครงข่ายแอคเซส เพื่อเชื่อมต่อไปยังระบบแอปพลิเคชัน ที่เกี่ยวข้องผ่านเครือข่ายหลักต่อไป เทคโนโลยีที่นำมาใช้ในโครงข่ายระบบสื่อสารปลายทาง นี้มีทั้งในลักษณะของแบบมีสาย และแบบไร้สาย เช่น การติดต่อสื่อสารผ่าน สายโทรศัพท์ พีแอลซี อีเทอร์เน็ต ไวไฟ ซิกบี และเครือข่ายระบบเซลลูลาร์ เป็นต้น โดยปัจจัยที่สำคัญในการเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสม ได้แก่ความเชื่อถือได้ของระบบ และเทคโนโลยีที่มีอนาคต ไม่ล้าสมัยภายในระยะเวลาอันสั้น เนื่องจากจะต้องเป็นโครงข่ายสำคัญที่มีการใช้งานอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน

การออกแบบโครงข่ายระบบสื่อสารปลายทาง จะต้องพิจารณาเปรียบเทียบ ระหว่างความเชื่อถือได้ของระบบ และต้นทุน ว่าควรจะมีคุณสมบัติอยู่ที่ระดับไหน เนื่องจากต่างจากโครงข่ายแบ็คโบน ที่ต้องมีความเชื่อถือได้สูงที่สุด ในขณะที่ในโครงข่ายระบบสื่อสารปลายทางนั้น การขาดการติดต่อจากโหนด ในระดับผู้ใช้ไฟฟ้าหนึ่งหลัง อาจไม่มีผลกระทบมาก จนถึงขนาดต้องลงทุนสร้างโครงข่ายเพิ่มเติมเพื่อให้ได้ความน่าเชื่อถือและความเร็วในการตอบสนอง ซึ่งจะไม่เกิดความคุ้มค่า การออกแบบโครงข่ายระบบสื่อสารปลายทาง จึงต้องมีการพิจารณาว่าต้องการความเชื่อถือได้ ที่พอเพียงระดับไหน และด้วยเงินลงทุนเท่าไรจึงจะเกิดความเหมาะสม ด้วยเหตุนี้เทคโนโลยีที่สามารถนำมาใช้ในโครงข่ายระบบสื่อสารปลายทาง จึงมีความหลากหลาย ที่ต้องพิจารณานำมาใช้ในการศึกษาและพิจารณาความเป็นไปได้และความเหมาะสม ของเทคโนโลยีระบบสื่อสารสำหรับโครงข่ายระบบสื่อสารปลายทาง จึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อให้ได้คำตอบในการเลือกใช้เทคโนโลยีที่สอดคล้องกับ โครงสร้างระบบสื่อสารของ กฟภ. มีความน่าเชื่อถือได้ เป็นเทคโนโลยีที่มีอนาคต และใช้เงินลงทุนที่เหมาะสม

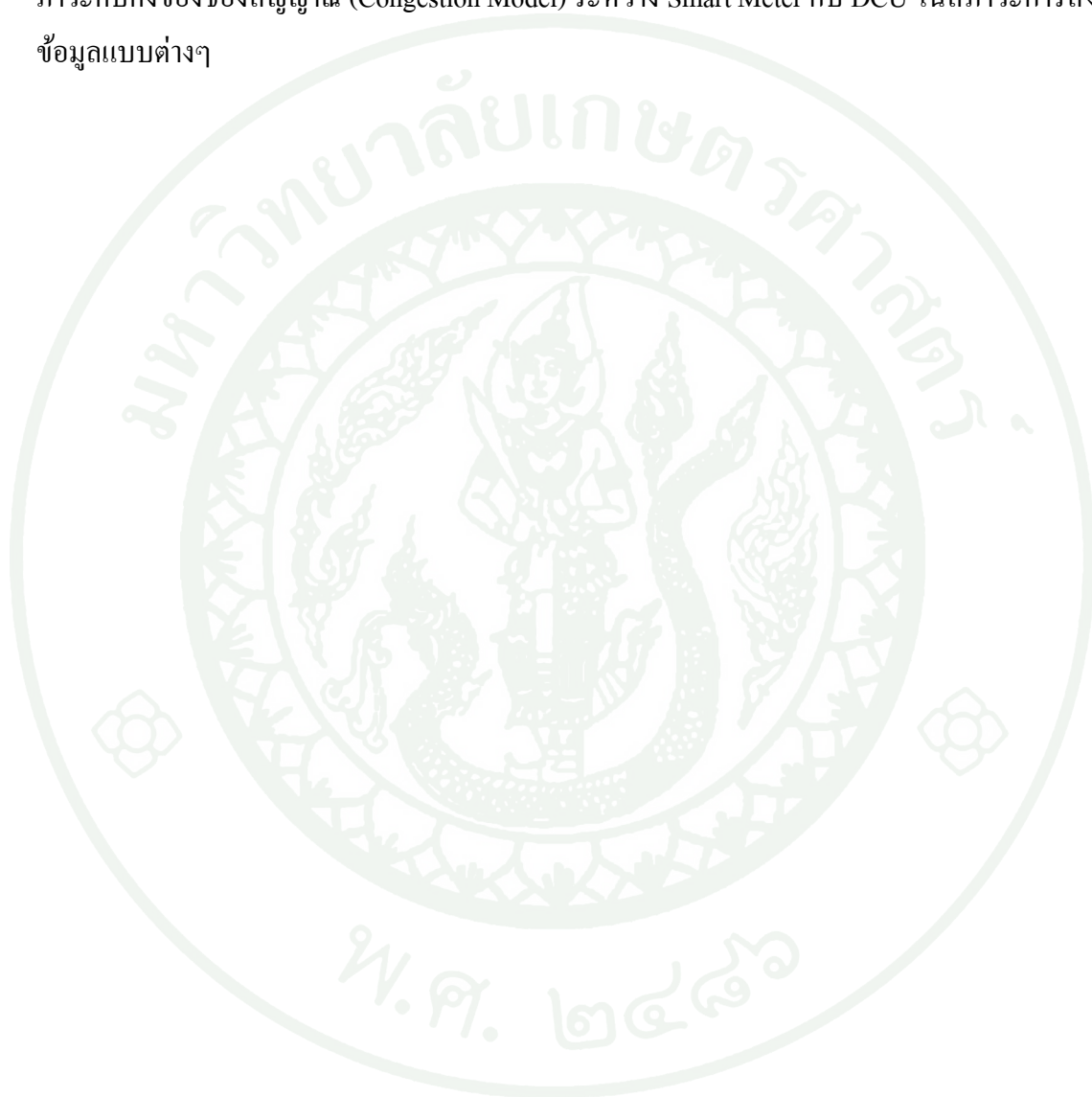
ระบบสื่อสาร PLC เป็นเทคโนโลยีที่มีความน่าสนใจ เนื่องจากมีค่าการลงทุนเทียบกับได้กับระบบสื่อสารแบบไร้สาย เพราะไม่ต้องลงทุนติดตั้งสายไฟฟ้าเพิ่มเติม และมีการใช้งานที่แพร่หลายสำหรับระบบมิเตอร์อัจฉริยะ AMI ในระบบสมาร์ตกริด การใช้งาน PLC มีหลายระดับขึ้นอยู่กับย่านความถี่ของคลื่นพาห์ที่ใช้งาน การใช้คลื่นพาห์ความถี่สูงจะทำให้อัตราเร็วของ PLC เพิ่มขึ้น แต่

พื้นที่ครอบคลุมจะลดลง ในขณะที่การใช้งาน PLC ที่ความถี่ต่ำจะสามารถส่งข้อมูลไปได้เป็นระยะทางหลายไมล์ แต่ก็ให้อัตราเร็วข้อมูลที่น้อยจนไม่เพียงพอต่อการส่งข้อมูลจำนวนมาก กพภ. พิจารณาระบบสื่อสาร PLC ย่านความถี่ปานกลาง ซึ่งให้อัตราเร็วข้อมูลและพื้นที่ครอบคลุมที่เหมาะสม

การพิจารณาความเหมาะสมในการนำระบบสื่อสาร PLC ย่านความถี่ปานกลางมาใช้ จึงอยู่ที่การพิจารณาจำนวนสมาร์ทมิเตอร์ที่ระบบสามารถรองรับได้ ในสถานการณ์การส่งข้อมูลแบบต่างๆ งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการพิจารณาประสิทธิภาพระบบสื่อสาร PLC ย่านความถี่ปานกลาง โดยเลือกใช้มาตรฐาน PRIME การประเมินประสิทธิภาพการส่งผ่านข้อมูลใช้วิธีสร้างแบบจำลอง รับ/ส่งข้อมูล ระหว่างสมาร์ทมิเตอร์กับดีชียู ในโครงข่ายระบบสื่อสารปลายทาง เพื่อคำนวณหาจำนวนสมาร์ทมิเตอร์สูงสุดที่ระบบสามารถรองรับได้โดยไม่เกิดภาวะคับคั่งของช่องสัญญาณ พร้อมทั้งคำนวณค่าทรูพุตของระบบสื่อสาร PLC เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการส่งข้อมูลในสถานะต่างๆ และได้นำเสนอเทคนิควิธีปรับปรุงประสิทธิภาพการส่งข้อมูล ให้ระบบสามารถรองรับสมาร์ทมิเตอร์ได้สูงขึ้น

วัตถุประสงค์

หาสมรรถนะของระบบสื่อสาร PLC สำหรับนำมาใช้งานเป็น Last Mile Network ในระบบ Smart Grid ของ กฟภ. โดยใช้จำนวนสมาร์ทมิเตอร์สูงสุดที่ระบบสามารถรองรับได้ โดยไม่เกิดภาวะคับคั่งของช่องสัญญาณ (Congestion Model) ระหว่าง Smart Meter กับ DCU ในสถานะการส่งข้อมูลแบบต่างๆ



การตรวจเอกสาร

ระบบสื่อสาร PLC

ระบบสื่อสาร Power Line Communication คือการสื่อสารข้อมูลผ่านสายไฟฟ้าโดยการกล้ำสัญญาณ (Modulate) คลื่นพาห์ (Carrier) ไปกับสัญญาณไฟฟ้า (การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2553) การใช้งาน PLC มีทั้งในส่วนของการสื่อสารข้อมูลผ่านสายส่งแรงดันสูง (High Voltage) สายกระจายแรงดันปานกลาง (Medium Voltage) และสายจำหน่ายแรงดันต่ำ (Low Voltage) ที่เชื่อมต่อไปยังผู้ใช้ไฟฟ้า โดยทั่วไปจะมีการใช้งาน PLC แยกกันในแต่ละส่วน แต่ก็มีกรณีที่มีการใช้งานข้ามส่วนหรือระดับของแรงดัน อัตราเร็วและพื้นที่ครอบคลุมของการใช้งาน PLC มีหลายระดับ ขึ้นอยู่กับย่านความถี่ของคลื่นพาห์ที่ใช้งาน การใช้คลื่นพาห์ความถี่สูงจะทำให้อัตราเร็วของ PLC เพิ่มขึ้น แต่พื้นที่ครอบคลุมจะลดลง ตัวอย่างเช่น การใช้งาน PLC ความเร็วสูง (Mbps) ผ่านสายไฟฟ้าภายในอาคารจะมีพื้นที่ครอบคลุมจำกัดเพียงประมาณ 1 ชั้น ในขณะที่การใช้งาน PLC ความเร็วปานกลาง (kbps) ส่งข้อมูลผ่านสายส่งแรงดันสูงเพื่อตรวจวัดและควบคุมระบบไฟฟ้าจะสามารถใช้งานได้เป็นระยะทางหลายไมล์ ดังนั้นจึงสามารถแบ่งประเภทของเทคโนโลยี PLC ได้ตามย่านความถี่ของคลื่นพาห์ที่ใช้งานดังนี้

PLC ย่านความถี่ปานกลาง (Narrowband Powerlines : NB-PLC) มีย่านความถี่ประมาณ 9 kHz ถึง 500 kHz ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับงานวัดและควบคุมในระบบไฟฟ้าอย่างแพร่หลาย เช่น ระบบอ่านค่ามิเตอร์อัตโนมัติ (Automatic Meter Reading : AMR) ระบบควบคุมโหลดระยะไกล (Load Control) การควบคุมสวิตช์เกียร์ (Switchgear Control) ระบบรีเลย์ป้องกัน (Protection Relay) และระบบการจัดการพลังงาน (Energy Management) รวมถึงเป็นเทคโนโลยีสื่อสารที่สำคัญของระบบมิเตอร์อัจฉริยะ (Advanced Metering Infrastructure : AMI) สำหรับสมาร์ตกริดมาตรฐานสำหรับ NB-PLC ในปัจจุบันได้แก่ PRIME, G3, IEEE P1901.2

PLC ย่านความถี่สูง (Broadband over Powerlines : BB-PLC) มีย่านความถี่ประมาณ 1.6 MHz ถึง 80 MHz ได้ถูกประยุกต์ใช้เพื่อให้บริการบรอดแบนด์อินเทอร์เน็ต (Broadband Internet) ผ่านสายไฟฟ้า นอกจากนี้เทคโนโลยี BB-PLC ยังถูกใช้ในการเชื่อมต่ออุปกรณ์สื่อสารและเครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ ภายในบ้าน เพื่อจัดสรรเป็นระบบเครือข่ายภายในบ้าน (Home Networking) โดยไม่จำเป็นต้องเดินสายเคเบิลเพิ่มเติม อย่างไรก็ตามการใช้งาน BB-PLC มีข้อจำกัดที่สำคัญได้แก่ สัญญาณรบกวนภายในสายไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากการปิดเปิดเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ ซึ่งส่งผล

กระทบต่อคุณภาพของสัญญาณ BB-PLC และในทางกลับกันสัญญาณของ BB-PLC ก็เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนไปยังระบบสื่อสารอื่นๆ ที่ใช้งานในย่านความถี่สูงเดียวกัน เช่น ระบบวิทยุสมัครเล่น ระบบสื่อสารของทหาร ระบบควบคุมการบิน เป็นต้น เนื่องจากสายไฟฟ้าทำตัวเสมือนเป็นสายอากาศ และไม่สามารถป้องกันการแพร่กระจายคลื่นความถี่ที่วิ่งอยู่ภายใน จึงต้องมีการกำหนดมาตรฐานขีดจำกัดกำลังส่งของสัญญาณ BB-PLC นอกจากนี้ สัญญาณ BB-PLC ยังมีระยะครอบคลุมที่จำกัด จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ทวนสัญญาณจำนวนมาก ในการติดตั้งเครือข่ายบรอดแบนด์ หากนำไปใช้งานในพื้นที่บริเวณกว้าง มาตรฐานสำหรับ BB-PLC ในปัจจุบันได้แก่ Homeplug Powerline Alliance, IEEE P1901, ITU-T G.hn

ระบบสื่อสารสำหรับสมาร์ตกริดนั้น สามารถเลือกเทคโนโลยีได้หลากหลาย ทั้งเคเบิลใยแก้วนำแสง ระบบสื่อสารไร้สาย และระบบสื่อสารใช้สาย ซึ่งในทางเลือกสำหรับระบบสื่อสารใช้สายด้วยกันแล้ว ระบบสื่อสาร PLC เป็นเทคโนโลยีเดียวที่มีค่าการลงทุนเทียบได้กับระบบสื่อสารแบบไร้สาย เนื่องจากไม่ต้องลงทุนติดตั้งสายไฟฟ้าเพิ่มเติม นอกจากนี้ระบบสื่อสาร PLC ยังเป็นเทคโนโลยีที่พัฒนามาจนถึงจุดที่สามารถนำมาใช้งานได้จริง ซึ่งจะเห็นได้จากการใช้งานที่แพร่หลายในกลุ่มประเทศยุโรป สำหรับระบบมิเตอร์อัจฉริยะ AMI

บทบาทของระบบสื่อสาร NB-PLC สำหรับสมาร์ทกริด

NB-PLC นั้นให้การสื่อสารแบบสองทิศทาง มีความสามารถในการสื่อสารข้อมูลได้แบบเรียลไทม์ (Real Time) และรองรับแอปพลิเคชันที่หลากหลาย (Stefano *et al.*, 2010) ไม่ว่าจะเป็นการวินิจฉัยหรือคาดการณ์อุปกรณ์ที่ทำให้ระบบไฟฟ้าขัดข้อง จึงมีความเหมาะสมเป็นอย่างมากสำหรับอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายของโครงข่ายไฟฟ้า เนื่องจากจุดติดตั้งของอุปกรณ์เหล่านี้จะได้รับข้อมูล การเปลี่ยนแปลงค่าทางระบบไฟฟ้าต่างๆ อยู่ตลอดเวลา ซึ่งสามารถติดตั้งอุปกรณ์สื่อสาร PLC เพื่อส่งข้อมูลเหล่านี้ไปยังศูนย์สั่งการหรือผู้ใช้ไฟฟ้าได้ทันที โดยในโครงข่ายระบบไฟฟ้าสายจำหน่ายแรงดันต่ำ ระบบสื่อสาร PLC จะทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าไปยังมิเตอร์แบบ Point-to-Multipoint หน้าที่ของระบบสื่อสาร NB-PLC สำหรับโครงข่ายระบบไฟฟ้าระดับแรงดันต่ำ มีดังต่อไปนี้

บทบาทของ NB-PLC ต่อระบบมิเตอร์อัจฉริยะ AMI

NB-PLC นั้นมีความเหมาะสมกับระบบมิเตอร์อัจฉริยะ AMI เป็นอย่างมาก ดังจะเห็นได้จากการนำอุปกรณ์สมาร์ทมิเตอร์ที่ใช้ระบบสื่อสาร PLC (PLC-based Smart Meters) มาติดตั้งใช้งานทั่วโลกเป็นจำนวนมากถึง 100 ล้านตัว โดยลักษณะการนำ NB-PLC มาใช้งานนั้นโดยส่วนใหญ่จะหลีกเลี่ยงการส่งข้อมูลข้ามหม้อแปลงไฟฟ้า แต่จะเป็นการเชื่อมต่อระหว่างสมาร์ทมิเตอร์แต่ละตัวที่อยู่ภายใต้หม้อแปลงไฟฟ้าเดียวกัน เชื่อมต่อมายังอุปกรณ์ DCU (Data Concentrator Unit) โดย DCU นี้จะทำหน้าที่รวบรวมข้อมูลจากสมาร์ทมิเตอร์ แล้วส่งต่อไปยังโครงข่ายแอคเซสต่อไป

บทบาทของ NB-PLC ต่อระบบดีมานด์เรสพอนส์ (Demand Response : DR)

ระบบดีมานด์เรสพอนส์เป็นแอปพลิเคชันหลักของสมาร์ทกริด ใช้งานกับสายจำหน่ายแรงดันต่ำ การดำเนินการของระบบดีมานด์เรสพอนส์ จำเป็นต้องสร้างการเชื่อมต่อระหว่างผู้ให้บริการยูทิลิตี้ (Utility) กับผู้ใช้บริการแอปพลิเคชัน NB-PLC สามารถเชื่อมต่อกับแอปพลิเคชันดีมานด์เรสพอนส์ ได้ทั้งในลักษณะการเชื่อมต่อแบบทางตรง (Direct) คือจากผู้ให้บริการยูทิลิตี้ ไปยังผู้ใช้บริการแอปพลิเคชันผ่านสายไฟฟ้าได้โดยตรง และการเชื่อมต่อแบบทางอ้อม (Indirect) คือเชื่อมต่อ NB-PLC เข้ากับระบบจัดการพลังงานภายในบ้าน (Home Energy Management System : HEMS) ซึ่งสามารถเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตได้ ทำให้สามารถส่งข้อมูลของผู้ใช้ไฟฟ้าไปยังผู้ให้บริการยูทิลิตี้ผ่านอินเทอร์เน็ต

ข้อดีของระบบสื่อสาร NB-PLC สำหรับสมาร์ตกริด

NB-PLC นั้นมีข้อดีหลายประการสำหรับสมาร์ตกริด ทั้งระบบมิเตอร์อัจฉริยะ และ ระบบดีมานด์เรสพอนส์ ในส่วนของการจัดการควบคุมแอฟพลีเคชัน (Appliance Control) หรือแม้แต่การนำ NB-PLC มาใช้สำหรับในรูปแบบของ BB-PLC ที่ถูกลดขนาดลงก็สามารถทำได้ (กล่าวคือ ลดความซับซ้อนของการส่งข้อมูล ลดกำลังในการส่ง และลดความเร็วของข้อมูล) โดยข้อดีของ NB-PLC มีดังต่อไปนี้

- มีความง่ายต่อการอัปเดตเวอร์ชันใหม่ๆ ในอนาคต โดยการใช้ โมเด็มแบบ Software ที่สามารถทำการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processing : DSP) ได้

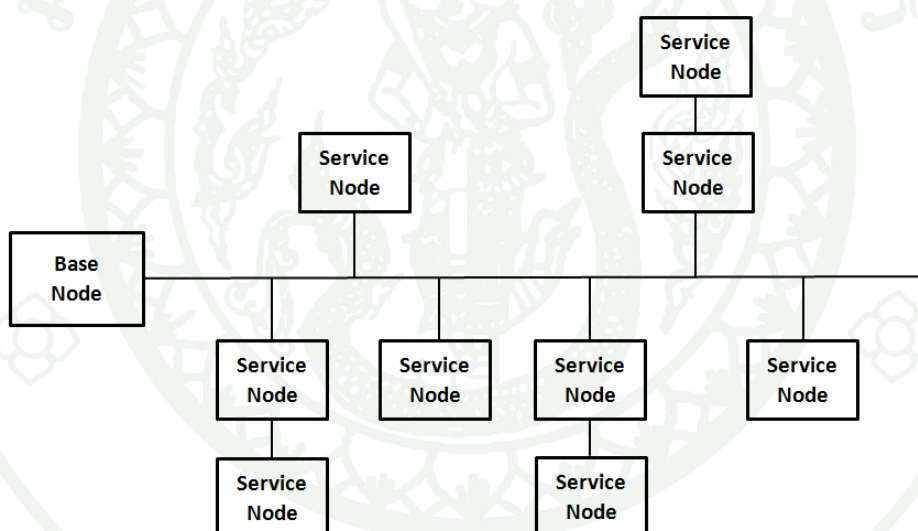
- สามารถใช้ย่านความถี่ได้ครอบคลุมทั่วโลก (Worldwide Harmonization) โดยย่านความถี่ที่ PLC สามารถใช้งานได้ทั่วโลกคือย่าน CENELEC (3 kHz ถึง 148.5 kHz) ซึ่งสอดคล้องกับข้อกำหนดในบางประเทศ ที่ไม่อนุญาตให้ใช้ย่านความถี่ที่สูงกว่า 2 MHz สำหรับการใช้งานภายนอกอาคาร

- NB-PLC ถูกออกแบบมาโดยเฉพาะสำหรับสมาร์ตกริด กล่าวคือ BB-PLC มาตรฐานต่างๆ เช่น IEEE 1901 หรือ ITU-T G.hn นั้นไม่ได้ถูกออกแบบมาเพื่อแอฟพลีเคชันสำหรับสมาร์ตกริดตั้งแต่ต้น แต่ถูกออกแบบมาเพื่อระบบเครือข่ายภายในบ้าน และการเข้าถึงแอฟพลีเคชันต่างๆ ทางอินเทอร์เน็ตเท่านั้น ในขณะที่ NB-PLC ซึ่งได้รับการพัฒนาเป็นมาตรฐาน G.hnem และ IEEE 1901.2 นั้นมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้สามารถรองรับการทำงานของ แอฟพลีเคชันของสมาร์ตกริด

ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าระบบสื่อสาร PLC ย่านความถี่ปานกลาง มีความสอดคล้อง และเหมาะสมกับการใช้งานในโครงข่ายระบบสื่อสารปลายทาง ทั้งระบบอ่านค่ามิเตอร์อัตโนมัติ และระบบมิเตอร์อัจฉริยะ ซึ่งเป็นแอฟพลีเคชันหัวใจหลักสำหรับสมาร์ตกริด เป็นอย่างยิ่ง ดังนั้น ในการศึกษาของการวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นไปที่ ระบบสื่อสาร PLC ย่านความถี่ปานกลาง โดยศึกษาถึงมาตรฐานและวิธีการนำไปใช้งาน เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับออกแบบโปรแกรมสำหรับจำลองการทำงาน การรับ/ส่ง ข้อมูล และวิเคราะห์สถานะคับคั่ง ระหว่างสมาร์ตมิเตอร์ กับอุปกรณ์ DCU

มาตรฐาน PRIME

สมาคม PRIME (Powerline Intelligent Metering Evolution) มีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดมาตรฐานกลางของระบบ PLC ย่านความถี่ปานกลาง (Narrowband PLC) เพื่อรองรับการใช้งานร่วมกันของอุปกรณ์สมาร์ตมิเตอร์ ที่มาจากผู้ผลิตที่แตกต่างกัน ให้ใช้งานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ผู้ให้บริการไฟฟ้าสามารถพัฒนาระบบมิเตอร์อัจฉริยะ AMI สำหรับสมาร์ตกริดได้อย่างรวดเร็วและประหยัดค่าใช้จ่าย มาตรฐานกลางที่กำหนดขึ้นของ NB-PLC เป็นส่วนของ Physical Layer (PHY) และ Medium Access Control Layer (MAC) โดยใช้บรรทัดฐานทางด้านเลเยอร์โปรโตคอล (Protocol Layering) จากมาตรฐาน IEEE 802.16 ดังนั้นผู้ผลิตอุปกรณ์ มิเตอร์ อุปกรณ์ DCU ชิพเซต หรืออุปกรณ์สำหรับระบบจัดการพลังงานภายในบ้าน จึงสามารถนำไปพัฒนาระบบสื่อสารของอุปกรณ์เหล่านี้ให้สามารถใช้งานร่วมกันได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ



ภาพที่ 2 โครงสร้างระบบเครือข่ายมาตรฐาน PRIME แบบ Tree Topology

ที่มา: PRIME Alliance (2012)

ทั้งนี้ PRIME ได้เลือกใช้เทคนิคการสื่อสารสัญญาณแบบ OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) ซึ่งโดยปกติจะถูกใช้ในการสื่อสารแบบบรอดแบนด์ มีข้อดีคือมีความทนทานต่อสัญญาณรบกวนในสายไฟฟ้า สามารถใช้คลื่นความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดความซับซ้อนของเครื่องรับสัญญาณ โดยที่ย่านความถี่ CENELEC-A ที่ใช้ สามารถส่งข้อมูลด้วย

อัตราเร็วสูงสุด 128.6 kbps ผู้ร่วมก่อตั้งสมาคม PRIME ได้แก่ Iberdora, ST Microelectronis, Texas Instruments, Landis Gyr, Itron, Current Group, Ziv Group และ Advanced Digital Design

โครงสร้างของระบบเครือข่ายของ PRIME

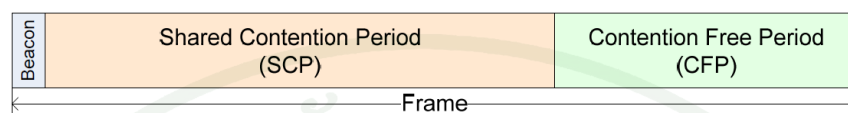
ระบบเครือข่ายทั้งระบบ ประกอบไปด้วยหลายๆ เครือข่ายย่อย (Subnetworks) โดยแต่ละเครือข่ายย่อย คือ โครงข่ายสายไฟฟ้า ที่อยู่หลังหม้อแปลงไฟฟ้าสายจำหน่ายแรงดันต่ำแต่ละตัว เครือข่ายย่อยของ PRIME จะมีลักษณะโครงสร้างแบบต้นไม้ (Tree Topology) (PRIME Alliance, 2012) ตามภาพที่ 2 ซึ่งประกอบไปด้วย Node สองชนิดคือ Base Node ซึ่งมีเพียงหนึ่ง Node ในหนึ่งเครือข่ายย่อย และหลายๆ Service Node ซึ่งสามารถทำงานได้ในโหมด Terminal คือทำหน้าที่รับข้อมูลเพียงอย่างเดียว หรือโหมด Switch ซึ่งสามารถส่งผ่านข้อมูล ที่ได้รับจาก Service Node ข้างเคียงได้

การเข้าใช้ช่องสัญญาณของ PRIME

การเข้าใช้ช่องสัญญาณสำหรับอุปกรณ์ PLC ที่ใช้มาตรฐาน PRIME นั้น ในการขนส่งข้อมูลในเครือข่าย การเข้าใช้ช่องสัญญาณแบบ TDM (Time Division Multiplex) จะเป็นการจัดสรรไทม์สล็อต (Time Slot) ซึ่งเป็นช่วงเวลาคงที่ ให้กับอุปกรณ์แต่ละตัวในเครือข่าย ซึ่งการส่งข้อมูลแบบ TDM นี้จะมีข้อเสียในกรณีที่ระบบต้องจัดสรรไทม์สล็อตให้กับอุปกรณ์ทุกตัว แม้ว่าอุปกรณ์นั้นจะหยุดส่งข้อมูลไปแล้วก็ตาม ทำให้ประสิทธิภาพการเข้าใช้ช่องสัญญาณต่ำ ซึ่งอาจแก้ปัญหานี้ได้ด้วยการใช้ TDM ที่มีการจัดสรรไทม์สล็อตแบบไดนามิก หรือเปลี่ยนมาใช้วิธีการเข้าใช้ช่องสัญญาณที่มีลักษณะเป็น CSMA/CA แทน อย่างไรก็ตามการการเข้าใช้ช่องสัญญาณแบบ CSMA/CA ก็มีข้อเสียเช่นกัน ในกรณีที่อุปกรณ์เป็นจำนวนมากในระบบมีความต้องการส่งข้อมูลพร้อมๆ กัน จะทำให้เกิดการชนกันของข้อมูลเป็นจำนวนมาก

วิธีการเข้าใช้ช่องสัญญาณของ PRIME จึงได้ประยุกต์การใช้งานร่วมกันของทั้งแบบ CSMA/CA และแบบ TDM โดยทำการจัดสรรให้การส่งข้อมูลในช่องสัญญาณ มีลักษณะเป็นเฟรมตามเวลา ดังภาพที่ 3 ทั้ง Base Node และ Service Node ในเครือข่ายสามารถเข้าใช้ช่องสัญญาณในช่วงเวลา Shared Contention Period (SCP) ซึ่งอุปกรณ์แต่ละตัวสามารถเข้าใช้งานได้ทันทีด้วยวิธีการเข้าใช้ช่องสัญญาณแบบ CSMA/CA หรือด้วยการร้องขอใช้ช่วงเวลา Contention Free Period (CFP) ไปยัง Base Node เพื่อขอให้ Base Node จัดสรรช่วงเวลาในการส่งข้อมูลด้วยการเข้า

ช่องสัญญาณแบบ TDM โดยอุปกรณ์ร้องขอไปยัง Base Node อาจจะได้รับอนุญาต หรือถูกปฏิเสธ การร้องขอก็ได้ โดยในการสร้างเฟรมข้อมูลสามารถกำหนดให้มีช่วง SCP ช่วงหนึ่งช่วงกับ CFP ช่วงหนึ่งช่วงหรือไม่มี CFP ก็ได้



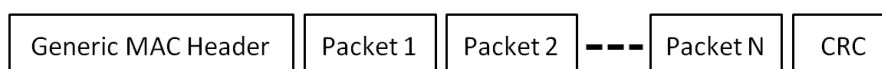
ภาพที่ 3 การจัดสรรช่องสัญญาณระหว่าง SCP และ CFP

ที่มา: PRIME Alliance (2012)

การสร้างเฟรมข้อมูลในชั้น MAC Layer ของ PRIME

สำหรับการสร้างเฟรมข้อมูล (Framing) ตามมาตรฐานของ PRIME ที่ใช้ในการส่งข้อมูลในชั้น MAC Layer นั้น มีเฟรมข้อมูล Protocol Data Unit (PDU) อยู่หลายประเภทสำหรับการใช้งานในแต่ละหน้าที่ (PRIME Alliance, 2012) สำหรับการขนส่งข้อมูลโดยส่วนใหญ่ในเครือข่ายย่อยนั้น จะใช้เฟรมข้อมูลแบบ Generic MAC PDU (GPDU) เป็นหลัก โดยหน้าที่การใช้งานของ GPDU นั้นจะใช้งานได้หลากหลาย ทั้งการส่งผ่านข้อมูลแบบดาต้า (Data) และส่งผ่านข้อมูลสัญญาณคอนโทรล การส่งข้อมูลด้วย GPDU จะใช้งานได้ทั่วไปสำหรับการทำงานในเครือข่ายย่อยใดๆ ยกเว้นกรณีการทำงานเฉพาะพิเศษที่ต้องการ PDU เฉพาะเท่านั้น การสร้างเฟรมข้อมูล GPDU แสดงได้ดังภาพที่ 4 ซึ่งจะประกอบไปด้วยส่วน Generic MAC Header ส่วน MAC Packets หลายๆ แพ็กเก็ต และส่วนสุดท้ายคือการตรวจสอบความผิดพลาดข้อมูล CRC

โดยขนาดความยาวข้อมูลของ Generic MAC Header จะมีขนาด 3 ไบต์ ส่วนความยาวข้อมูลของส่วน MAC Packets จะประกอบไปด้วยส่วนของ Packet Header ขนาด 6 ไบต์ และส่วนของ Payload ซึ่งในการส่งข้อมูลสามารถกำหนดความยาวได้ ตามแต่ขนาดและชนิดของข้อมูลที่ต้องการส่ง และสามารถกำหนดได้ว่าการส่งไปใน GPDU แต่ละครั้งจะประกอบไปด้วย ส่วน MAC Packets จำนวนกี่แพ็กเก็ต และสุดท้ายขนาดความยาวข้อมูลของส่วน CRC จะมีขนาด 4 ไบต์



ภาพที่ 4 โครงสร้างของเฟรมข้อมูล Generic MAC PDU

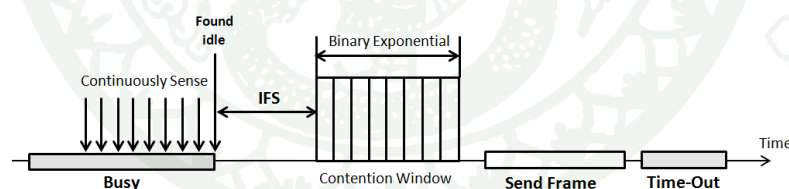
ที่มา: PRIME Alliance (2012)

นอกจากนี้ในมาตรฐาน PRIME ยังมี PDU สำหรับทำงานเฉพาะพิเศษ อีกหลายรูปแบบ ตามแต่ละหน้าที่การใช้งาน เช่น Promotion Needed PDU ใช้สำหรับให้ Service Node ที่ทำหน้าที่เป็น Terminal Mode ส่งข้อมูลไปยัง Node ช้างเคียงที่ทำหน้าที่เป็น Switch Mode อยู่แล้ว เพื่อขอให้ Service Node นั้นเปลี่ยนเป็น Switch Mode เช่นเดียวกัน Beacon PDU มีหน้าที่สำหรับการทำซิงโครไนส์ของระบบเครือข่ายย่อย และใช้สำหรับกำหนดช่วงเวลาสำหรับการเข้าใช้ช่องสัญญาณแบบ TDM กับแบบ CSMA/CA

การเข้าใช้ช่องสัญญาณแบบ CSMA/CA

การลดโอกาสของการชนกันของข้อมูลจากการส่งข้อมูลพร้อมๆ กันของอุปกรณ์หลายๆ ตัวในระบบ และเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานช่องสัญญาณให้สูงขึ้น สามารถใช้วิธีการ CSMA (Carrier Sense Multiple Access : CSMA) (Behrouz, 2007) โดยวิธีนี้อุปกรณ์ทุกตัวในระบบจะต้องทำการตรวจสอบช่องสัญญาณก่อนส่งข้อมูล (Sense Before Transmit) CSMA สามารถลดความน่าจะเป็นของการชนกันของข้อมูลได้ แต่ก็ยังมีโอกาสที่จะเกิดการชนกันของข้อมูลได้อยู่ เนื่องจากการตรวจสอบช่องสัญญาณของอุปกรณ์ที่อยู่ไกลมากๆ จะตรวจสอบพบว่าช่องสัญญาณว่าง ทั้งที่แท้จริงแล้วอาจมีอุปกรณ์ที่อยู่ต้นทางของระบบส่งข้อมูลออกมาแล้ว ทั้งนี้สาเหตุที่อุปกรณ์ที่ไกลตรวจสอบไม่พบว่ามีกำลังส่งข้อมูลจากอุปกรณ์ต้นทาง เนื่องจากการส่งข้อมูลของอุปกรณ์ต้นทางต้องใช้เวลาช่วงหนึ่ง ในการเดินทางของข้อมูลจึงจะทำให้อุปกรณ์ที่อยู่ไกลสามารถตรวจสอบพบได้ เรียกช่วงเวลานี้ว่า Propagation Delay Time

สามารถเพิ่มโอกาสการหลีกเลี่ยงการชนกันของข้อมูล จากการส่งข้อมูลแบบ CSMA ได้อีกด้วยวิธีการ CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอนดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การเข้าใช้ช่องสัญญาณแบบ CSMA/CA

ที่มา: Behrouz (2007)

Interframe Space (IFS) ลำดับแรก การชนกันของข้อมูลสามารถหลีกเลี่ยงได้ ด้วยการหน่วงเวลา ก่อนส่งข้อมูล ถึงแม้ว่าช่องสัญญาณ ณ ขณะนั้นจะว่างก็ตาม เมื่ออุปกรณ์ที่ต้องการส่งข้อมูลตรวจสอบพบว่าช่องสัญญาณว่าง จะยังไม่ส่งข้อมูลทันที แต่จะรอด้วยช่วงเวลาคำหนึ่งเรียกว่า Interframe Space หรือ IFS ทั้งนี้เพื่อแก้ปัญหาทางด้าน Propagation Delay Time จากอุปกรณ์ที่อยู่

ห่างจากอุปกรณ์ที่จะส่งข้อมูลนั่นเอง ช่วงเวลา IFS ยังสามารถใช้จัดลำดับความสำคัญในการส่งข้อมูลของอุปกรณ์ในระบบได้ด้วย เนื่องจากสามารถกำหนดค่า IFS ที่แตกต่างกันได้ในแต่ละอุปกรณ์ ดังนั้นอุปกรณ์ที่มีค่า IFS น้อยก็จะมีโอกาสส่งข้อมูลได้มากกว่าอุปกรณ์ที่มีค่า IFS มาก

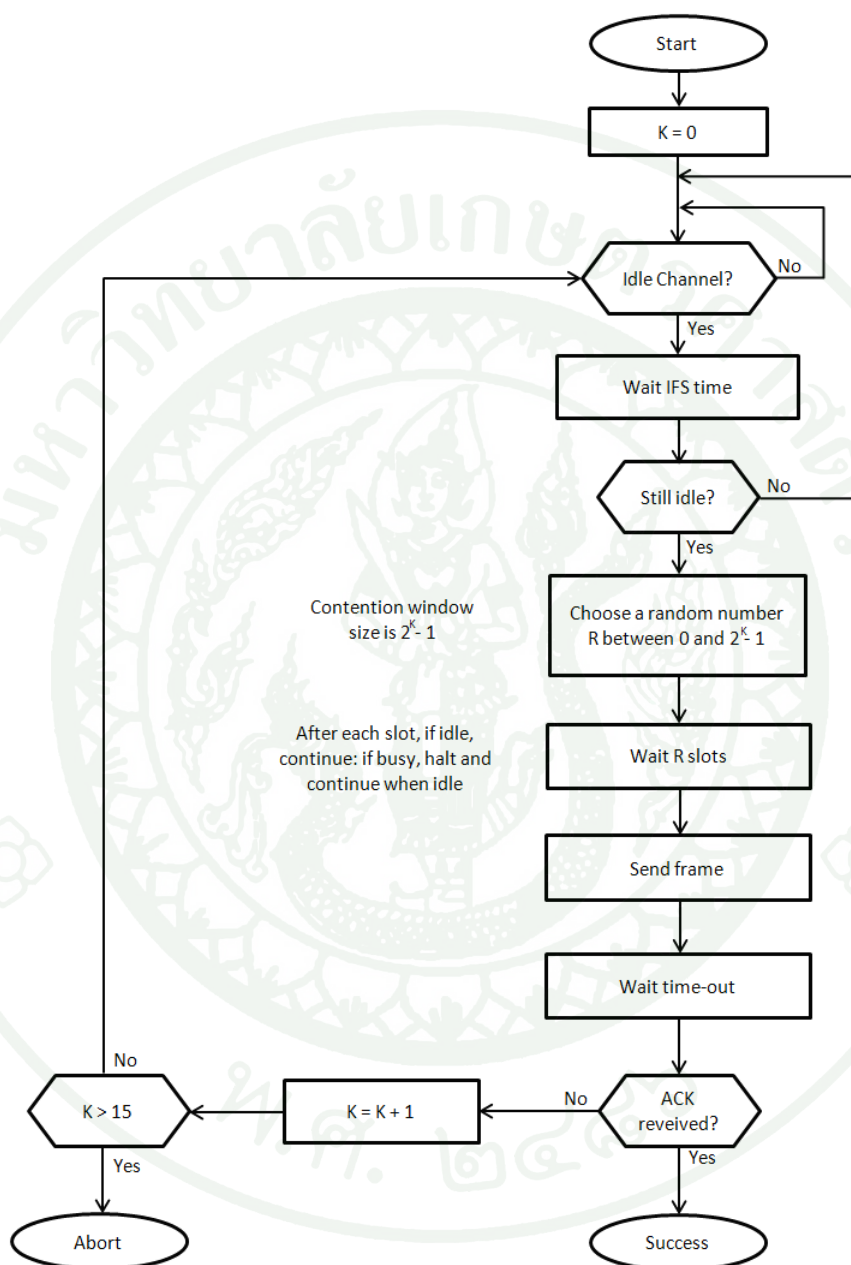
Contention Window เป็นช่วงเวลาที่ถูกแบ่งเป็นไทม์สล็อต อุปกรณ์ที่พร้อมจะส่งข้อมูลหลังจากถูกหน่วงเวลา IFS ไปแล้ว จะได้รับค่าสุ่มจำนวนไทม์สล็อตในการหน่วงเวลา (ซึ่งค่าจำนวนไทม์สล็อตที่อุปกรณ์จะสุ่มได้นั้น จะเปลี่ยนค่าไปตามวิธีการที่เรียกว่า Binary Exponential Back-Off) การตรวจสอบช่องสัญญาณของอุปกรณ์ที่จะส่ง จะต้องตรวจสอบทุกครั้งหลังจากหน่วงเวลาไปแต่ละไทม์สล็อต เมื่อครบการรอตามจำนวนไทม์สล็อตที่สุ่มได้ อุปกรณ์ก็จะส่งข้อมูลได้ ในทางตรงกันข้ามหากอุปกรณ์ตรวจพบว่าช่องสัญญาณไม่ว่าง มันจะรอจนกว่าช่องสัญญาณว่างจึงหน่วงเวลาต่อจนครบจำนวนไทม์สล็อตก็จะสามารถส่งข้อมูลได้ โดยไม่ต้องเริ่มกระบวนการทั้งหมดใหม่

การเปลี่ยนค่าแบบ Binary Exponential Back-Off คือในการส่งข้อมูลครั้งแรกจำนวนไทม์สล็อตจะเท่ากับหนึ่ง จากนั้นจำนวนไทม์สล็อตสูงสุดที่จะสุ่มได้จะเพิ่มเป็นสองเท่าทุกครั้งที่อุปกรณ์ฝั่งส่งไม่ได้รับ Acknowledge จากอุปกรณ์ฝั่งรับ การที่อุปกรณ์ฝั่งส่งไม่ได้รับ Acknowledge จากฝั่งรับ เกิดจาก ณ ช่วงเวลานั้นมีอุปกรณ์เป็นจำนวนมากใช้งานช่องสัญญาณ การหน่วงเวลาที่นานขึ้นจากค่าจำนวนไทม์สล็อตที่เพิ่มขึ้น ก็จะช่วยให้อุปกรณ์ไม่ต้องส่งข้อมูลไปในช่วงเวลานั้น ซึ่งเป็นการหลีกเลี่ยงภาวะความคับคั่งของช่องสัญญาณ

Acknowledgement ด้วยกระบวนการป้องกันการชนกันของข้อมูลทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น ทั้งนี้ยังมีโอกาสที่จะเกิดการชนกันของข้อมูลได้ ซึ่งจะทำให้ข้อมูลที่ชนกันเป็นข้อมูลที่ไม่สามารถใช้ได้ การยืนยันว่าอุปกรณ์ฝั่งรับได้รับข้อมูลจากอุปกรณ์ฝั่งส่งแล้ว ก็คือ Acknowledgement หรือการยืนยันการได้รับข้อมูล ที่อุปกรณ์ฝั่งรับส่งกลับไปให้อุปกรณ์ฝั่งส่งทราบ ภายในช่วงเวลาที่กำหนด (Time-out Timer) ในทางกลับกัน หากอุปกรณ์ฝั่งส่งไม่ได้รับ Acknowledgement จากทางฝั่งรับภายในช่วงเวลาที่กำหนด อุปกรณ์ทางฝั่งส่งต้องส่งเฟรมข้อมูลนั้นใหม่

ขั้นตอนการเข้าใช้ช่องสัญญาณแบบ CSMA/CA สามารถเขียนเป็น Flow Diagram ได้ดังภาพที่ 6 ซึ่งจะเห็นว่าอุปกรณ์ที่จะส่งข้อมูล ต้องทำการตรวจสอบช่องสัญญาณทั้งก่อนและหลังช่วง IFS และทุกๆ ช่วงไทม์สล็อตของ Contention Window ซึ่งในขั้นตอนนี้ หากพบว่าช่องสัญญาณว่าง

ไทม์เมอร์จะถูกนับไปเรื่อยๆ แต่ถ้าหากช่องสัญญาณไม่ว่าง ไทม์เมอร์จะหยุดและถูกนับต่อไปได้เมื่อพบว่าช่องสัญญาณว่างอีกครั้ง

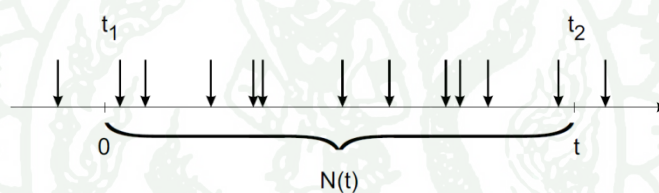


ภาพที่ 6 Flow Diagram ขั้นตอนการเข้าใช้ช่องสัญญาณแบบ CSMA/CA

ที่มา: Behrouz (2007)

กระบวนการปัวซอง (Poisson Process)

กระบวนการปัวซองเป็นโมเดลที่สำคัญ ที่ใช้ในทฤษฎีแถวคอย (Queuing Theory) สำหรับอธิบายกระบวนการที่ลูกค้ามาถึง (Arrival Process of Customers) หรือสำหรับในทฤษฎีระบบสื่อสาร จะใช้อธิบายการเรียกใช้งานของผู้ใช้โทรศัพท์ หรือการส่งแพ็คเก็ตข้อมูลของอุปกรณ์สื่อสาร กระบวนการปัวซองเป็น โมเดลที่ใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ เมื่อการเรียกใช้งานเกิดจากกลุ่มผู้ใช้งานขนาดใหญ่ และการเรียกใช้งานของผู้ใช้แต่ละคนเป็นอิสระต่อกัน (Virtamo, 2012) การเรียกใช้งานในกระบวนการปัวซองสามารถพิจารณาได้เป็นการเกิดตัวแปรสุ่มแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Arrivals) ดังภาพที่ 7 โดยกำหนดให้จำนวนครั้งของการเรียกใช้งานในช่วงเวลา 0 ถึง t เรียกว่า N_t หรือ $N(t)$ หรือสามารถอธิบายได้เป็น $N(t_1, t_2)$ ซึ่งหมายถึงจำนวนครั้งของการเรียกใช้งานในช่วงเวลา t_1 ถึง t_2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ $N(t_2) - N(t_1)$



ภาพที่ 7 การเกิดตัวแปรสุ่มแบบไม่ต่อเนื่องของกระบวนการปัวซอง

ที่มา: Virtamo (2012)

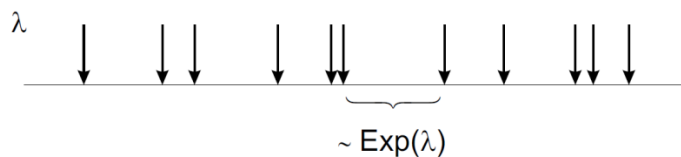
หากกำหนดให้ λ เป็นอัตราของการเรียกใช้งาน หรือความน่าจะเป็นของการเรียกใช้งานต่อหน่วยเวลา จะสามารถคำนวณหาค่าจำนวนการเรียกใช้งาน $N(t)$ ได้จาก สมการฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็น (pdf) แบบปัวซองดังนี้

$$P\{N(t) = n\} = \frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!} \quad (1)$$

และหากกำหนดให้ช่วงเวลาระหว่างการเรียกใช้งานแต่ละครั้งเป็นอิสระต่อกัน และมีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล จะสามารถนิยามกระบวนการปัวซองได้ดังสมการ (2)

$$P\{\text{interarrival time} > t\} = e^{-\lambda t} \quad (2)$$

ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของสมการนี้ ได้ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 กระบวนการปัวซองที่นิยามจากช่วงเวลาการเรียกใช้งาน

ที่มา: Virtamo (2012)

หากกำหนดให้ในช่วงเวลาที่กำหนด 0 ถึง t ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น $(0, t)$ มีจำนวนการเรียกใช้งาน $N(t)$ เป็นจำนวน n ครั้ง โดยการเรียกใช้งานจำนวน n ครั้งนี้ จะเป็นอิสระต่อกันและมีการแจกแจงแบบเดียวกัน สามารถสร้างการเรียกใช้งาน ของกระบวนการปัวซองในช่วงเวลา $(0, t)$ นี้ได้ โดยหาค่า n จากฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปัวซอง จากนั้นสำหรับการเรียกใช้งานแต่ละครั้ง เป็นจำนวน n ครั้ง ให้เขียนลงไปบนช่วงเวลา $(0, t)$ ด้วยการแจกแจงแบบยูนิฟอร์ม (Uniform Distribution) ที่แต่ละค่าการเรียกใช้งานนี้มีอิสระต่อกัน

การพิจารณาประสิทธิภาพการส่งผ่านข้อมูล

การพิจารณาประสิทธิภาพการส่งผ่านข้อมูลของเครือข่ายเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อใช้วัดคุณภาพของการให้บริการ (Quality of Service) การส่งข้อมูลของระบบเพื่อนำไปสู่การปรับปรุง หรือ หลีกเลี่ยงภาวะคับคั่งของการส่งผ่านข้อมูลได้ (Behrouz, 2007) ในการพิจารณาประสิทธิภาพการส่งผ่านข้อมูล จำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยต่างๆ ดังนี้

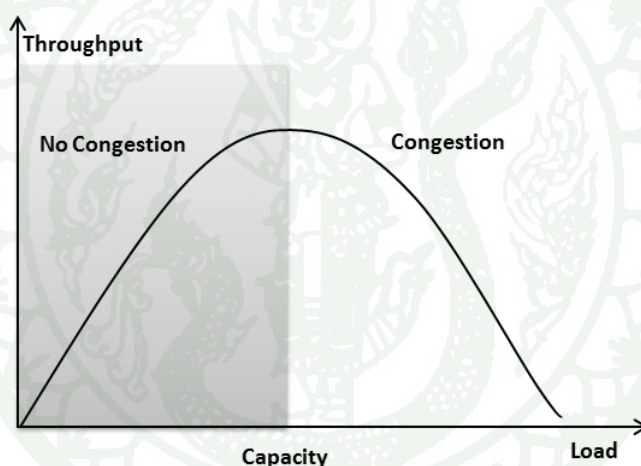
ทราฟฟิค (Throughput)

ค่าทราฟฟิค (Throughput) เป็นการวัดค่าความเร็วที่แท้จริงของการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณได้สำเร็จ การส่งผ่านข้อมูลนี้ สามารถพิจารณาได้ทั้งแบบ physical link logical link หรือพิจารณาเฉพาะการส่งผ่านข้อมูลของ Node ในระบบเครือข่ายก็ได้ ค่าทราฟฟิคสามารถวัดเป็นหน่วย บิตต่อวินาที (bps) หรือ จำนวนแพ็กเก็ตข้อมูลต่อวินาที ตามหลักการแล้วค่าทราฟฟิคจะเพิ่มขึ้น หาก Offered Load เพิ่มขึ้น โดย Offered Load เป็นข้อมูลที่ Node ทั้งหมด ส่งออกมาพร้อมกันในช่วงเวลาหนึ่ง ค่าทราฟฟิคนี้จะเพิ่มขึ้นไปจนถึงค่าสูงสุด (Maximum Throughput) ที่เครือข่ายจะรับได้ ก่อนที่จะมีค่าลดลง จากภาวะความคับคั่งของช่องสัญญาณ (Congestion) อย่างไรก็ตามค่าทราฟฟิคในระบบเครือข่าย ยังขึ้นอยู่กับวิธีการเข้าช่องสัญญาณ วิธีการบอร์คาสท์ จำนวน Load บนเครือข่าย และอัตราการเกิด Error ในช่องสัญญาณ

ในการออกแบบอุปกรณ์ และระบบสื่อสาร จำเป็นที่จะต้องศึกษาถึงศักยภาพการส่งผ่านข้อมูลของระบบ เพื่อหากระบวนการวิธีการส่งผ่านข้อมูลให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด ในการวิเคราะห์ดังกล่าวนี้ สามารถใช้ค่า Maximum Throughput มาพิจารณาเป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบ การส่งผ่านข้อมูลของระบบที่ศึกษาได้ ค่า Maximum Throughput สามารถนิยามได้หลายวิธีด้วยกัน โดยในงานวิจัยนี้ ใช้ค่า **Peak Measured Throughput** หรือเรียกว่า **Instantaneous Throughput** ซึ่งเป็นค่าทราฟฟิคสูงสุดที่วัดได้จากระบบจริงๆ หรือจากการจำลองการทำงานของระบบในช่วงระยะเวลาหนึ่ง การวัดค่านี้เป็นประโยชน์อย่างมากกับระบบที่มีการส่งข้อมูลในลักษณะแบบเบิร์สต์ (Burst Data Transmission)

ภาวะคับคั่งของช่องสัญญาณ (Congestion)

ปัญหาที่สำคัญในการขนส่งข้อมูลในระบบเครือข่ายนั้น คือภาวะคับคั่งของช่องสัญญาณ ซึ่งเกิดได้จากการส่งผ่านข้อมูลหรือโหลด (Load) ในเครือข่าย มีค่ามากกว่าความจุ (Capacity) ของช่องสัญญาณ จึงทำให้เครือข่ายไม่สามารถรองรับแพ็คเก็ตข้อมูลเหล่านี้ได้ การควบคุมความคับคั่ง จึงเป็นกลไกสำหรับการควบคุมและรักษาให้ระบบเครือข่าย มีโหลดค่าต่ำกว่าความจุของช่องสัญญาณ โดยสาเหตุที่ทำให้เกิดภาวะคับคั่งในเครือข่าย เกิดจากการที่ อุปกรณ์เราเตอร์และสวิตช์ มีการรอคิวการใช้งานเกิดขึ้น ทำให้ต้องใช้บัฟเฟอร์เก็บค่าแพ็คเก็ตข้อมูล ก่อนที่จะประมวลผลส่งผ่านข้อมูลต่อไปได้ การพิจารณาประสิทธิภาพของเครือข่าย จึงเกี่ยวข้องโดยตรงกับภาวะคับคั่งของช่องสัญญาณ และค่าทราฟฟิค



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระการส่งผ่านข้อมูลกับค่าทราฟฟิค

ที่มา: Behrouz (2007)

ประสิทธิภาพของเครือข่าย (Network Performance)

การพิจารณาประสิทธิภาพของเครือข่าย เกี่ยวข้องโดยตรงกับภาวะคับคั่งของช่องสัญญาณ และค่าทราฟฟิค ในการพิจารณาประสิทธิภาพของเครือข่าย สามารถอธิบายได้ด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างภาระการส่งผ่านข้อมูลกับค่าทราฟฟิค ดังภาพที่ 9 โดยกำหนดให้ค่าทราฟฟิคคือจำนวนแพ็คเก็ตข้อมูลที่ส่งผ่านได้ ในเครือข่ายในหน่วยเวลา จากภาพจะสังเกตได้ว่า ขณะที่โหลดมีค่าน้อยกว่า

ความจุช่องสัญญาณ ค่าทรูพุตจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของโหลด หลังจากนั้นเมื่อเข้าสู่ภาวะกับ
 คั้งจะพบว่าค่าทรูพุตมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อถึงจุดความจุของช่องสัญญาณ จะเกิดแพ็คเก็ตข้อมูลที่
 ถูกเราเตอร์สละทิ้ง จากการรอคิวที่ยาวเกินกว่าบัฟเฟอร์ของเราเตอร์ เป็นเหตุให้แหล่งข้อมูล ต้องส่ง
 ข้อมูลใหม่ทดแทนข้อมูลที่ถูกละทิ้ง



การศึกษาการออกแบบ และวิเคราะห์โครงข่ายระบบสื่อสาร สำหรับสมาร์ทกริด

ในการออกแบบโครงข่ายระบบสื่อสารโดยการวิเคราะห์และคาดการณ์ปริมาณการส่งผ่านข้อมูล (Data Traffic) สำหรับสมาร์ทกริด และการพิจารณาศักยภาพของโครงสร้างพื้นฐานระบบสื่อสาร สำหรับรองรับสมาร์ทกริดนั้น สามารถพิจารณาได้จากการวิเคราะห์และคาดการณ์การส่งผ่านข้อมูลที่จะเกิดจากการใช้งานจริงในอนาคต (Wenpeng *et al.*, 2010) ได้ทำการพิจารณาจากแอปพลิเคชันต่างๆ ของสมาร์ทกริด ที่จะนำมาใช้งาน ซึ่งอาจมาจากการเชื่อมต่อของอุปกรณ์หรือมาจากผู้ใช้ไฟฟ้าก็ได้ จากการศึกษา แอปพลิเคชันหลักๆ ที่จำเป็นต้องใช้งานจะถูกกำหนดขึ้น มีการส่งผ่านข้อมูลออกมาเป็นเป็นชุดข้อมูลที่เรียกว่า “Data Traffic Profiles” ที่มีความสอดคล้องกับแอปพลิเคชันนั้นๆ ข้อมูลที่ได้นี้จะถูกคำนวณออกมาทั้งสำหรับ วันที่ท้องฟ้าอากาศปลอดโปร่งและแบบ วันที่มีฝนฟ้าคะนอง ซึ่งโอกาสที่จะเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าขัดข้องจะต่างกัน การคาดการณ์จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้า และอุปกรณ์ในระบบ สำหรับการทำงานของแอปพลิเคชันต่างๆ จะเป็นตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณและสร้าง Data Traffic Profiles ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นออกมา จากข้อมูลที่คำนวณได้ จะทำให้สามารถทราบถึงความต้องการของประสิทธิภาพของระบบสื่อสาร เพื่อการวางแผนการออกแบบโครงข่ายระบบสื่อสารในอนาคต

ในการออกแบบโครงสร้างพื้นฐานระบบสื่อสารเพื่อการรองรับสมาร์ทกริดนั้น ไม่เพียงแต่พิจารณาถึงการรองรับการใช้งานของระบบ AMR เพียงอย่างเดียว แต่ยังต้องพิจารณาถึงอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบจำหน่ายและสถานีไฟฟ้าด้วย นอกจากนี้ในการออกแบบยังต้องคำนึงถึงการเติบโตของโครงข่ายระบบไฟฟ้าในอนาคตอีกด้วย สำหรับการพิจารณาการออกแบบโครงสร้างพื้นฐานระบบสื่อสารสำหรับสมาร์ทกริด จำเป็นต้องพิจารณาเป้าหมายหลักอันได้แก่ รูปแบบและความเร็วในการส่งผ่านข้อมูลในโครงข่ายระบบสื่อสารของสมาร์ทกริด แบบจำลองที่เพียงพอ ต่อความต้องการต่อการใช้งาน และความสามารถในการรองรับสมาร์ทกริดในอนาคต ของอุปกรณ์และระบบสื่อสารในปัจจุบัน เปรียบเทียบความคุ้มค่าในการลงทุน ระหว่างการอัปเกรดระบบเดิม กับการติดตั้งอุปกรณ์ใหม่

สำหรับการพิจารณาถึงการส่งผ่านข้อมูลที่ใช้งานสำหรับสมาร์ทกริดนั้น ในการศึกษาของงานวิจัยนี้ ได้ทำการจำแนกแอปพลิเคชันออกเป็น 3 กลุ่มคือ Smart Metering, Grid Monitoring and Control, และ Advanced Applications ซึ่งแอปพลิเคชันแต่ละกลุ่ม จะประกอบไปด้วยแอปพลิเคชันเพื่อรองรับการใช้งาน และแอปพลิเคชันเพื่อแสดงหรือจัดการ เหตุการณ์ต่างๆ ของสมาร์ทกริด จากนั้น จากเหตุการณ์แต่ละแบบ หรือการทำงานในรูปแบบที่แตกต่างกันของแต่ละ

แอปพลิเคชัน ทำให้สามารถแจกแจงความเป็นไปได้ของชนิดของข้อมูล (Data Message Types) ขนาดแพ็คเกจของข้อมูล (Packet Size) ซึ่งขึ้นอยู่กับโปรโตคอลของข้อมูลชนิดนั้นๆ ด้วย

ตารางที่ 1 ชนิดและลักษณะของข้อมูล สำหรับเหตุการณ์และแอปพลิเคชันต่างๆ ของสมาร์ทกริด

Message / Traffic Description	Prop- ortion (%)	Size in Bytes	Inter- Arrival interval	Inter- Arrival Unit	Delay Objec- tive	Storm Multi- plier	Direct- ion
Interval data read	100	480	1	Day	Best effort	1	Up
Tamper notification	10	64	26	Weeks	5 sec	1	Up
Meter remote disconnect /reconnect request	0.01	20	1	Day	2 sec	1	Down
Meter remote disconnect /reconnect response	0.01	500	1	Day	2 sec	1	Up
In-home display, load control	20	60	6	Hours	5 sec	1	Down
In-home display, Critical Peak Pricing alert	100	60	12	Hours	5 sec	1	Down
Meter ping (on demand)	100	64	4	Weeks	2 sec	5	Both- way
Meter firmware patch / upgrade	100	50000	1	Year	Best effort	1	Down
Firmware patch/upgrade confirm/acknowledge	100	20	1	Year	Best effort	1	Up
Meter clock synchronize	100	64	1	Day	2 sec	1	Both- way
Meter remote diagnostic	0.03	500	1	Day	2 sec	1	Both- way

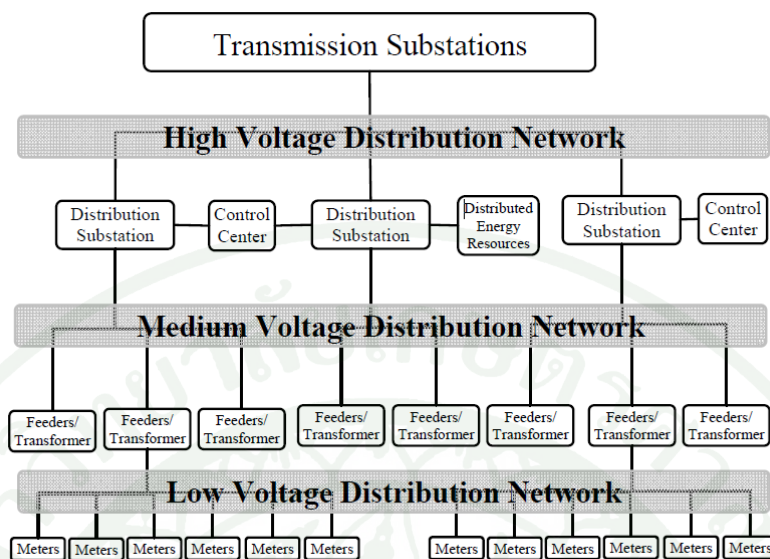
ที่มา: Wenpeng *et al.* (2010)

กระบวนการวิธีส่งผ่านข้อมูล (Data Flow Process) ความถี่และช่วงเวลาของการใช้ข้อมูลแต่ละชนิด รวมถึงความน่าจะเป็นสำหรับเหตุการณ์ต่างๆ เหล่านี้เป็นต้น โดยตารางที่ 1 เป็นตัวอย่างผลลัพธ์ของ Data Traffic Profiles ที่ได้

จะสังเกตเห็นว่า Data Traffic Profiles ในแต่ละแอปพลิเคชันจะมีความแตกต่างกัน อาทิ เช่น สำหรับแอปพลิเคชัน Interval Data Read ของสมาร์ทมิเตอร์ จะทำการส่งข้อมูลวันละ 1 ครั้ง ด้วยขนาดข้อมูล 480 Bytes โดยมีทิศทางของข้อมูล Up คือจากอุปกรณ์ปลายทางส่งผ่านข้อมูลไปยังศูนย์สั่งการ ในขณะที่แอปพลิเคชัน In-Home Display Load Control จะทำงานเป็นรายชั่วโมงๆ ละ 6 ครั้ง ด้วยขนาดข้อมูล 60 Bytes โดยมีทิศทาง Down คือจากศูนย์สั่งการส่งผ่านข้อมูลไปยังผู้ใช้ไฟฟ้า เป็นต้น นอกจากนี้เรายังสามารถวิเคราะห์เหตุการณ์ในลักษณะ “วันที่มีฝนฟ้าคะนอง” ด้วยการคูณตัวเลข Storm Multiplier เข้าไป นั่นหมายความว่าโอกาสและจำนวนข้อมูล ที่จะเกิดขึ้นจะมีจำนวนมากขึ้นเป็นจำนวนเท่าตามตัวคูณของเหตุการณ์นั้นๆ ซึ่งจากข้อมูลที่ได้ เราสามารถนำมาทำการวิเคราะห์ศักยภาพของโครงสร้างพื้นฐานระบบสื่อสารเดิมที่มีอยู่ หรือใช้สำหรับออกแบบโครงข่ายระบบสื่อสารขึ้นใหม่ ให้มีความสามารถในการรองรับ การส่งผ่านข้อมูลทั้งหมด ทั้งโครงข่ายระบบไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การคำนวณค่าความแบนด์วิดท์ที่ระบบต้องการ สำหรับรองรับคุณสมบัติของโครงสร้างพื้นฐานของระบบโครงข่าย (Grid Infrastructure) นั้น (Amit *et al.*, 2010) ใช้วิธีการพิจารณาแบบจำลองสถาปัตยกรรมของระบบจำหน่ายไฟฟ้าชั้นพื้นฐานที่มีขนาดกลาง (Medium-Sized Grid) และค่าความเร็ว Latency ที่กำหนด พิจารณาการส่งข้อมูลผ่านทางแบ็คโบนที่เป็นโครงข่ายเคเบิลใยแก้วนำแสง ในการศึกษาี้ สามารถนำค่าแบนด์วิดท์ที่คำนวณได้ มาใช้ประโยชน์สำหรับการออกแบบโครงสร้างพื้นฐานระบบสื่อสารที่จะรองรับสมาร์ทกริดในอนาคต ในการศึกษา สามารถแบ่งโครงข่ายระบบไฟฟ้าออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากโรงงานไฟฟ้ามายังสถานีไฟฟ้า (Distribution Substations) และระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้ามายังผู้ใช้ไฟฟ้า โดยพิจารณาตามภาพที่ 10 แสดงถึงโครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายระบบไฟฟ้า ซึ่งส่งจ่ายพลังงานในระดับ High Voltage (>230 kV) ไปสู่สถานีไฟฟ้า

จากการอ้างอิงข้อมูลของประเทศสหรัฐอเมริกา จาก U.S. Department of Energy, Office of Electricity Delivery and Energy Reliability ในปี ค.ศ. 2006 สามารถคำนวณจำนวนอุปกรณ์ต่างๆ ตามภาพที่ 10 ได้ดังนี้



ภาพที่ 10 โครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายระบบไฟฟ้า

ที่มา: Amit *et al.* (2010)

จำนวน Transmission Substation และ Power Plants เท่ากับ 10,287 สถานี

จำนวน Distribution Substation เท่ากับ 2,179 สถานี

จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าโดยประมาณ 131 ล้านครัวเรือน

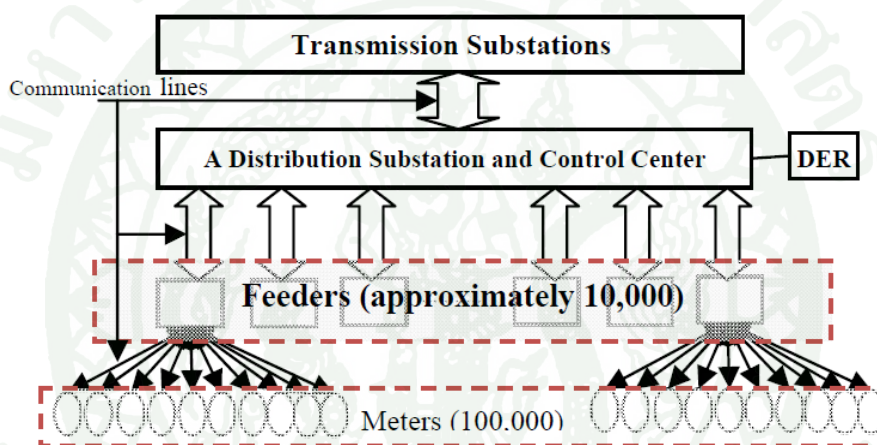
จำนวนอุปกรณ์สาธารณูปโภค Distributed Energy Facilities โดยประมาณ 5,600 ชุด

จำนวนอุปกรณ์ยูทิลิตี้ต่างๆ ประมาณ 3,100 ชุด

อุปกรณ์ทั้งหมดเหล่านี้ในระบบสมาร์ตกริด จะต้องติดตั้งอุปกรณ์เซนเซอร์ และการเชื่อมต่อระบบสื่อสาร เข้ากับจุด (Node) ของโครงข่ายระบบไฟฟ้า อันประกอบไปด้วย สมาร์ทมิเตอร์ อุปกรณ์ใน ฟีดเดอร์ อุปกรณ์ในสายจำหน่ายระดับแรงดันต่ำ อุปกรณ์ในระบบสายส่งของสถานีไฟฟ้า และอุปกรณ์ที่สถานีไฟฟ้า แหล่งพลังงานต่างๆ และศูนย์ควบคุมสั่งการระบบไฟฟ้า ซึ่งเป็นที่ประจักษ์ว่าโครงสร้างพื้นฐานระบบสื่อสารที่ต้องออกแบบมานั้น ต้องมีศักยภาพเพียงพอเพื่อรองรับอุปกรณ์ทั้งหมดนี้ ดังนั้นมีสิ่งที่จะต้องพิจารณา 2 อย่างด้วยกัน คือ

ค่าความเร็ว Latency ของระบบสื่อสาร เป็นสิ่งที่จำเป็นต้องพิจารณาเป็นหลัก สำหรับสมาร์ทกริด ทั้งนี้เนื่องจากการส่งผ่านข้อมูลของศูนย์สั่งการ ต้องสามารถตรวจจับข้อมูลที่ผิดพลาดได้ และทำการแก้ไขได้ทันทีทันใด จึงจะสามารถป้องกันข้อผิดพลาดของการสั่งการอุปกรณ์ในระบบได้ ค่าความเร็ว Latency ของระบบสื่อสารนี้ จะมีต้องมีค่าไม่เกิน 10 ms

ปริมาณการส่งผ่านข้อมูล จากการติดตั้งอุปกรณ์เซนเซอร์ และอุปกรณ์ควบคุมต่างๆ เข้าไปในโครงข่ายระบบไฟฟ้าเดิม เป็นการเพิ่มปริมาณข้อความจำนวนมากส่งผ่านในระบบ ระบบต้องรองรับปริมาณข้อมูลนี้ได้



ภาพที่ 11 การทำ Quantification สำหรับโครงข่ายระบบไฟฟ้า

ที่มา: Amit *et al.* (2010)

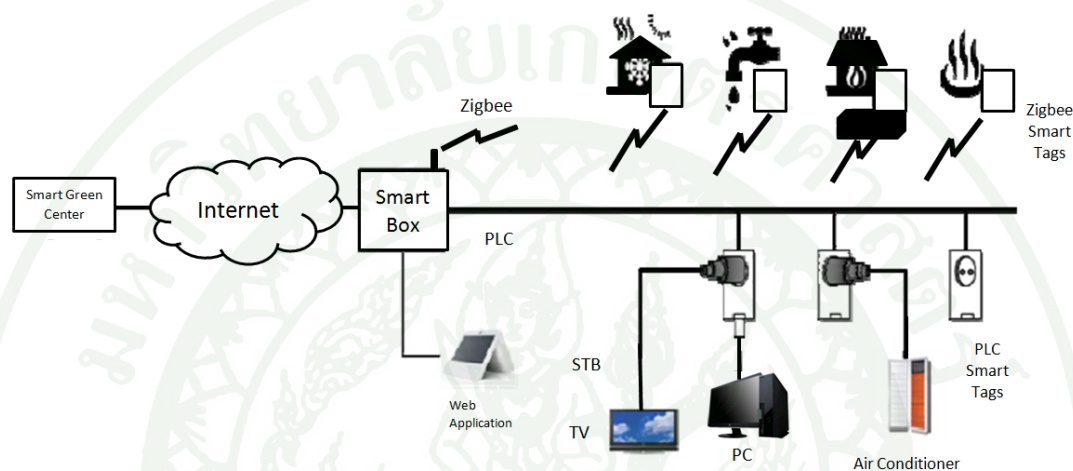
การคำนวณค่าแบนด์วิธของระบบสื่อสาร จากข้อมูลอุปกรณ์ทั้งหมดที่ได้คำนวณไว้ โดยพิจารณาภาพที่ 11 แสดงสถานีไฟฟ้าแบบ Distribution Substation (DS) หนึ่งสถานี จำหน่ายกระแสไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าจำนวน 100,000 ครั้วเรือน ผ่านทางสายส่งจำนวน 10,000 ฟีดเดอร์ นั่นคือแต่ละ ฟีดเดอร์เชื่อมต่อกับผู้ใช้ไฟฟ้าโดยเฉลี่ย ฟีดเดอร์ละ 10 ครั้วเรือน จากข้อมูลดังกล่าวสามารถคำนวณค่าแบนด์วิธที่ต้องการ ได้ดังโดย สมมติให้สมาร์ทมิเตอร์ของแต่ละครั้วเรือนผู้ใช้ไฟฟ้า มีการส่งข้อมูลมายัง DS ทุกๆ วินาที ซึ่งจะได้ข้อความทั้งหมดจำนวน 100,000 ข้อความ ในทุกๆ หนึ่งวินาที ในขณะที่ฟีดเดอร์เองก็มีการส่งข้อมูลของมันไปสู่ DS เช่นกัน โดยการ คำนวณ

ค่าสมมติจากอุปกรณ์ต่างๆ ทั้งหมด จะได้ว่า จะเกิดข้อมูลจำนวน 1 ล้านข้อความในทุกๆ หนึ่งวินาที หากประมาณค่าโดยเฉลี่ยให้ข้อความที่เกิดขึ้นมีขนาดโดยเฉลี่ย 100 บิต

และจากการพิจารณาค่าความเร็ว Latency ที่กำหนดคือ 10 ms ก็จะสามารถคำนวณค่าความเร็วในการรับส่งข้อมูล โดยใช้ทฤษฎีแถวคอย (Queuing Theory) และใช้ทฤษฎีคอนเวนชันแนลเทอมิโนโลยี (Conventional Terminology) โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการอนุมานทั้งขนาดความยาวเฉลี่ยของข้อความ ความเร็ว Latency ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10 ms และดังที่ได้กล่าวถึงจำนวนของข้อความทั้งหมดหนึ่งล้านข้อความต่อวินาที ในการศึกษาของงานวิจัยนี้ จะสามารถคำนวณค่าแบนด์วิดท์ออกมาได้ ซึ่งเป็นค่าแบนด์วิดท์ของระบบสื่อสารที่ต้องการใช้งานสำหรับสมาร์ตกริดทั้งระบบ ที่ได้อนุมานมาจากข้อมูลทางสถิติและจากพื้นฐานของสมมติฐานต่างๆ ทั้งจำนวนอุปกรณ์ การรับส่งข้อมูล ตลอดจนขนาดของข้อมูลในการรับ/ส่ง จะทำให้สามารถคาดการณ์สิ่งที่จำเป็นสำหรับการออกแบบระบบสื่อสารเพื่อรองรับสมาร์ตกริดในอนาคตได้

การพิจารณา แอปพลิเคชันต่างๆ สำหรับการใช้งานสมาร์ตกริดในอนาคต เมื่อเกิดการใช้งานจริง จะมีแอปพลิเคชัน และรูปแบบการใช้งานต่างๆ เกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก แอปพลิเคชันและการใช้งานเหล่านี้จำเป็นต้องนำมาพิจารณา เช่นเดียวกับส่วนของการสื่อสารข้อมูลระหว่างผู้ใช้ไฟฟ้ากับศูนย์สั่งการ ที่จำเป็นต้องพิจารณาการกำหนดรูปแบบการให้บริการ หรือรูปแบบการนำเสนอข้อมูลให้กับผู้ใช้ไฟฟ้า ในทางกลับกัน ผู้ใช้ไฟฟ้าก็สามารถที่จะปฏิสัมพันธ์กับระบบที่ทางผู้ให้บริการได้จัดสรรให้ (Jisun *et al.*, 2010) ได้ศึกษาการพิจารณาแอปพลิเคชัน และการใช้งานสมาร์ตกริด เป็นกรณีศึกษาตัวอย่างของบริษัท Korea Telco (KT) โดยบริษัท Korea Telco เป็นบริษัททางด้านโทรคมนาคมที่ใหญ่ที่สุดในประเทศเกาหลีใต้ ทางบริษัทมีการวิจัยเทคโนโลยีเกี่ยวกับการจัดการด้านพลังงานอยู่หลายๆ กลุ่ม ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นงานวิจัยทางด้านระบบเทคโนโลยีสารสนเทศ เทคโนโลยีพลังงานสะอาด สมาร์ทแอปพลิเคชัน และระบบชาร์จไฟฟ้าสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมีการดำเนินงานที่มีความโดดเด่นเป็นอย่างมากของบริษัท คือการดำเนินโครงการทางด้านสมาร์ตกริด ในส่วนของยูทิลิตี้และการนำไปใช้งาน โดยในปัจจุบันศักยภาพของบริษัทนั้น สามารถให้บริการทางด้านระบบเทคโนโลยีสารสนเทศ แก่ลูกค้าประเภทครัวเรือนถึง 20 ล้านครัวเรือน และลูกค้าประเภทหุ้นส่วนธุรกิจ (B2B Partners) จำนวน 3 ล้านราย KT มีเป้าหมายในอนาคต ที่จะจัดสรรบริการทางด้านสมาร์ตกริดให้เป็นบริการหนึ่งในหลายๆ บริการทางด้านพลังงานที่ตนมีอยู่ ด้วยบริการของ KT ที่เรียกว่า “KT Smart Green Service” ซึ่งเป็นบริการสำหรับการจัดการทางด้านพลังงานสำหรับผู้บริโภคไฟฟ้าประเภทครัวเรือน โดยในงานวิจัยได้แสดงให้เห็นว่า KT ได้นำเอาบริการนี้เข้ามานำเสนอและใช้งานในสมาร์ตกริดอย่างไร

ผู้บริโภคสามารถตรวจสอบการใช้พลังงานไฟฟ้าของตนได้อย่างแม่นยำ ด้วยการต่อคอมพิวเตอร์หรือ โทรศัพท์เคลื่อนที่ เข้ากับเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ก็จะสามารถตรวจสอบค่าพลังงานไฟฟ้าที่ตนใช้ไป หรือค่าไฟฟ้าได้ตามเวลาจริง บริการ KT Smart Green Service สำหรับผู้ใช้ไฟฟ้านั้นมีส่วนประกอบต่างๆ ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 โครงสร้างของบริการ KT Smart Green Service

ที่มา: Jisun *et al.* (2010)

สมาร์ทกรีนเซนเตอร์ (Smart Green Center : SGC) เป็นระบบศูนย์กลางการและบริหารจัดการพลังงาน โดยฟังก์ชันการทำงานหลักๆ ของ SGC นั้นสามารถแบ่งได้เป็น 1) ระบบมอนิเตอร์สมาร์ทแท็ก/สมาร์ทบ็อกซ์ 2) ระบบแอปพลิเคชันเซิร์ฟเวอร์สำหรับให้บริการผู้ใช้ไฟฟ้า และ 3) ระบบดาต้าแวร์เฮาส์ (Data Warehouse) ศูนย์สั่งการสมาร์ทกรีนเซนเตอร์นี้ ทำหน้าที่จัดการข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้า วิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งระบบ ตามช่วงเวลา หรือตามพื้นที่

สมาร์ทแท็ก (Smart Tag) เป็นอุปกรณ์ที่ประกอบเข้าไปกับอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ ภายในบ้าน ทำหน้าที่มอนิเตอร์และควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องใช้ไฟฟ้าแต่ละตัว

สมาร์ทบ็อกซ์ (Smart Box) ทำหน้าที่เก็บรวบรวมข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าจากสมาร์ทมิเตอร์ รวมทั้งข้อมูลการใช้งานของอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ ภายในบ้านจากสมาร์ทแท็ก ซึ่ง

จากภาพที่ 12 จะเห็นว่าการสื่อสารระหว่างสมาร์ตบ็อกซ์ กับสมาร์ตแทก แต่ละตัวนั้นสามารถใช้ระบบสื่อสารได้ทั้ง ซิกบี หรือระบบสื่อสาร PLC ตามแต่ความเหมาะสม การรวบรวมข้อมูลของสมาร์บ็อกซ์ จะส่งต่อไปยัง สมาร์ทกรีนเซนเตอร์ ในทางกลับกันสมาร์ตบ็อกซ์ ก็สามารถที่จะรับข้อมูลการสั่งการ จากสมาร์ทกรีนเซนเตอร์ผ่านทางอินเทอร์เน็ต และส่งข้อมูลการสั่งการนั้นไปยังสมาร์ตแทกเพื่อควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าได้

สมาร์ทมิเตอร์ ทำหน้าที่วัดการใช้พลังงานไฟฟ้าของทั้งระบบภายในบ้าน จากนั้นส่งข้อมูลไปยังสมาร์ทกรีนเซนเตอร์ โดยสามารถที่จะส่งข้อมูลได้ด้วยตัวเองหรือส่งข้อมูลผ่านทางสมาร์ตบ็อกซ์ ก็ได้ ตามแต่ประเภทของระบบเครือข่าย ซึ่งสำหรับระบบเครือข่ายของ KT แล้ว อุปกรณ์สมาร์ทมิเตอร์จะไม่สามารถส่งข้อมูลไปยังสมาร์ทกรีนเซนเตอร์ได้โดยตรง ต้องส่งผ่านทางสมาร์ตบ็อกซ์เท่านั้น

อุปกรณ์ควบคุมและสั่งการระยะไกล (Remote Access Device) ผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถที่จะเข้าใช้งานผ่านทางเว็บแอปพลิเคชัน เพื่อดูข้อมูลทางสถิติต่างๆ ของการใช้พลังงานของตน หรือของผู้บริโภคทั้งหมดในพื้นที่ของตน ผ่านทางคอมพิวเตอร์ หรือโทรศัพท์เคลื่อนที่ เชื่อมต่อผ่านระบบอินเทอร์เน็ต อีกทั้งยังสามารถที่จะควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ภายในบ้านของตนผ่านทางเว็บแอปพลิเคชันนี้ ได้อีกด้วย โดยแอปพลิเคชันและการใช้งานสมาร์ทกริดสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าแบบครัวเรือน ที่ “KT Smart Green Service” ได้จัดทำไว้ให้สำหรับผู้ใช้ไฟฟ้า ได้แก่ บริการทางด้านการมอนิเตอร์การใช้พลังงานไฟฟ้า ของผู้บริโภค และบริการทางด้านการควบคุมสั่งการอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้าน

ความจำเป็นที่จะต้องทราบถึงประสิทธิภาพ ของระบบเครือข่าย และเป็นที่มาของการพัฒนา แบบจำลองการวิเคราะห์ ระบบเครือข่ายที่รองรับการขนส่งข้อมูลหลายๆ แบบ ทั้งข้อมูลแบบแพ็กเก็ต และข้อมูลแบบเสียง ข้อมูลอันหลากหลายนี้มีสถานะการเรียกใช้งานที่แตกต่างกัน ระบบเครือข่ายต้องสามารถรองรับข้อมูลเหล่านี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องทราบถึงประสิทธิภาพของระบบเครือข่าย (Dahmouni *et al.*, 2010) ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบเครือข่ายโทรศัพท์เซลลูลาร์ ซึ่งนำไปใช้สำหรับคำนวณค่าประสิทธิภาพของระบบเครือข่ายในสถานะการส่งข้อมูลหลายๆ แบบ หรือในสถานะความคับคั่งของจำนวนผู้ใช้งานที่แตกต่างกัน แบบจำลองที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ ใช้พื้นฐานของทฤษฎี คอนตินิวอัสมาร์คอฟเชนน์ (Continuous Time Markov Chains : CTMC) ซึ่งได้นำประเด็นหัวใจหลักของคอนตินิวอัสมาร์คอฟเชนน์ มาทำการพิสูจน์อย่างสามารถวิเคราะห์ได้

จนได้สมการที่แบบจำลองใช้ในการคำนวณค่าผลลัพธ์ของการจำลอง เป็นค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของคุณภาพการให้บริการ (Quality of Service) อาทิเช่น การใช้งานช่องสัญญาณวิทยุ (Radio Resource Utilization) ค่าเฉลี่ยทราฟฟิค (Average Throughput) และความน่าจะเป็นของการปฏิเสธการเข้าใช้ (Blocking Probability) เป็นต้น ในงานวิจัยยังได้แสดงให้เห็นถึงความท้าทายหลักของงานทางด้านวิศวกรรม สำหรับระบบเครือข่ายที่ให้บริการข้อมูลได้หลากหลายประเภท (Multi-Service Networks) นั่นคือการบูรณาการ และการสนับสนุนต่อส่วนงานเชิงกว้างของแอปพลิเคชัน การให้บริการข้อมูลหลากหลายประเภทเช่นนี้ มีความต้องการคุณภาพการให้บริการที่แตกต่างกัน และค่าการส่งผ่านข้อมูลของแต่ละบริการ ก็ถูกจำแนกลักษณะเฉพาะโดยค่าปกติของกระบวนการ เปิด/ปิด ของการใช้งานช่องสัญญาณของข้อมูลแต่ละประเภท ความยากของระบบวิศวกรรมเครือข่าย เนื่องจาก การส่งผ่านข้อมูลถูกสร้างขึ้นจากผู้ใช้งาน ซึ่งขึ้นอยู่กับการใช้แอปพลิเคชันแต่ละประเภทและเป็นลักษณะการใช้งานที่ต่อเนื่อง ยิ่งไปกว่านั้นความน่าจะเป็นที่จะใช้งานร่วมกันของ ไทม์สล็อตช่องเดียวกัน ของผู้ใช้หลายๆ คน และการจัดสรรแบนด์วิดท์ ระหว่างเสียง กับข้อมูลแพ็กเก็ต ของการส่งผ่านข้อมูลก็เป็นสิ่งที่ซับซ้อนต่อการวิเคราะห์

ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาลงไปที่ “พฤติกรรมที่แท้จริงของผู้ใช้งาน” ซึ่งสร้างเซตชั้นการเรียกใช้งานด้วยค่าเวลาการใช้ที่จำกัด ในงานศึกษา ได้นำเสนอแบบจำลองการวิเคราะห์ประสิทธิภาพ ออกมา 2 แบบจำลอง โดยแบบจำลองแรกสร้างจากทฤษฎี คอนตินิวอัสม์ มาร์คอฟเชนน์ แบบโมนอวาริเอท (Monovariate) แบบจำลองที่สองสร้างจากทฤษฎี คอนตินิวอัสม์ มาร์คอฟเชนน์ แบบมัลติวาริเอท (Multivariate) กระบวนการวิเคราะห์จะทำการสร้างรูปแบบสูตรคำนวณสำหรับการกระจายแบบสเตชันนารี (Stationary Distribution) ของทั้งสองแบบจำลอง และพิสูจน์ว่าค่าพารามิเตอร์ทางด้านประสิทธิภาพ อันได้แก่ความน่าจะเป็นของการปฏิเสธการเข้าใช้ และค่าทราฟฟิค นั้นมีค่าเท่ากันของทั้งสองแบบจำลองที่สภาวะความหนาแน่นของการเรียกใช้งานของผู้ใช้ (Intensity) เท่ากัน ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาและพิสูจน์ให้เห็นถึงผลลัพธ์ที่เหมือนกันที่สภาวะเดียวกัน ของแบบจำลองการวิเคราะห์ทั้งสองแบบ ของระบบเครือข่ายโทรศัพท์เซลลูลาร์ส่งข้อมูลแบบ จีพีอาร์เอส/เอดจ์ แสดงให้เห็นว่าผลลัพธ์ที่ได้ คือสูตรสมการที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงของผู้ใช้งานโทรศัพท์

การประเมินค่าประสิทธิภาพการส่งผ่านข้อมูลของระบบเครือข่าย สำหรับระบบสื่อสารแบบเอฟดีดีไอ (Fiber Distributed Data Interface : FDDI) โดยมาตรฐานเอฟดีดีไอ เป็นเครือข่ายแบบส่งผ่านโทเคน (Token Passing) โดยใช้สายใยแก้วนำแสงต่อสถานีเป็นวงแหวนสองวง โดยทิศทางการไหลของข้อมูลในวงแหวนทั้งสองวงจะตรงกันข้ามกัน วงแหวนวงหนึ่งจะทำหน้าที่เป็น

เส้นทางหลักในการรับส่งข้อมูล ในขณะที่ทั้งสองจะเป็นเส้นทางสำรอง เพื่อเพิ่มความเชื่อถือได้ และความแข็งแรงให้กับเครือข่าย ส่วนใหญ่จะใช้เอฟดีดีไอ เป็นแบ็คโบนของเครือข่าย เนื่องจากมีแบนด์วิธที่สูง และสามารถเชื่อมต่อสถานีได้ไกล เอฟดีดีไอนั้นรองรับทั้งการส่งข้อมูลทั้งแบบซิงโครนัส และอะซิงโครนัส อนุญาตให้แต่ละสถานีสามารถมีข้อมูลแบบอะซิงโครนัส หลายๆ คลาสได้ และยังผ่านข้อกำหนดของแต่ละคลาสที่แตกต่างกัน ตามลำดับความสำคัญทางเวลา (timer-based priority scheme) อีกด้วย จึงจำเป็นจะต้องมีการพิจารณาประสิทธิภาพของเครือข่ายเอฟดีดีไอ ที่รองรับการขนส่งข้อมูลแบบหลายๆ คลาส โดย (Werahera and Jayasumana, 1994) ใช้แบบจำลองการวิเคราะห์ในการประเมินค่าทรูพุต ของทั้งการส่งผ่านข้อมูลแบบซิงโครนัสและอะซิงโครนัส ตัวแบบจำลองสามารถใช้คำนวณค่าทรูพุต ของแต่ละ ลำดับคลาส (priority class) และหาค่าเฉลี่ยเวลาวงรอบของโทเคน (mean token-cycle time) ของเครือข่าย เมื่อเครือข่ายมีการการส่งข้อมูลตั้งแต่ค่าน้อยๆ ไปจนถึงค่ามาก สมการในการคำนวณค่าได้จากการพิจารณาลักษณะเฉพาะของค่าทรูพุต และค่าเฉลี่ยเวลาวงรอบโทเคน ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพารามิเตอร์ของระบบเครือข่าย การจำลองการทำงานใช้สำหรับตรวจสอบความถูกต้องของ แบบจำลองการวิเคราะห์ที่ใช้ โดยผลที่ได้จากการจำลองการทำงาน สามารถนำไปใช้ทดสอบการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยการหน่วงเวลาในการเข้าถึง (mean access delay) สำหรับแต่ละคลาส และใช้ทดสอบการแจกแจงของค่าเวลาวงรอบของโทเคน ของแต่ละลำดับความสำคัญได้อีกด้วย

แบบจำลองที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ ทำการคาดการณ์ ค่าทรูพุต ของเครือข่ายเอฟดีดีไอ ภายใต้เงื่อนไขทั้งภาวะปกติ และภาวะที่มีภาระการส่งผ่านข้อมูลเป็นจำนวนมาก โดยได้ใช้แนวความคิดพื้นฐานของ ไทม์-โทเคน โปรโตคอล (timed-token protocol) การประเมินประสิทธิภาพของเครือข่ายเอฟดีดีไอใช้โทเคน-ริงคลาสแบบเฮเทอโรจีเนียส ทั้งการส่งผ่านข้อมูลแบบซิงโครนัส และแบบอะซิงโครนัส ใช้ สัญญาณเสียงสำหรับแทนการส่งผ่านข้อมูลแบบซิงโครนัส (ซึ่งสามารถใช้ข้อมูลแบบซิงโครนัสชนิดใดๆ แทนก็ได้) แบบจำลองคาดการณ์ค่าทรูพุตของเครือข่ายเอฟดีดีไอ ในแต่ละลำดับความสำคัญ ตั้งแต่ ต่ำ กลาง ไปจนถึงภาระการส่งผ่านข้อมูลสูง โดยแบบจำลองสมมุติให้การกระจายของภาระการส่งผ่านข้อมูลระหว่างแต่ละคลาสที่ได้รับ ความสำคัญ ณ สถานี เป็นค่าที่รู้อยู่แล้ว สมการต่างๆ ที่สัมพันธ์กับลักษณะเฉพาะของค่าทรูพุตของเครือข่าย ได้ถูกแสดงไว้อย่างสมบูรณ์ในรูปของ พารามิเตอร์ของระบบเครือข่าย ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของแต่ละคลาสที่แตกต่างกัน ทั้งสำหรับการส่งผ่านข้อมูลแบบซิงโครนัส และแบบอะซิงโครนัส โดยผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองที่โครงการวิจัยนี้สร้างขึ้นสามารถคาดการณ์ค่า และลักษณะของทรูพุต ทั้งในกรณีภาระการส่งผ่านข้อมูลมีขนาดต่ำ กลาง และสูง ได้อย่างแม่นยำ ทำให้สามารถที่จะวางแผนและออกแบบ

พารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบเครือข่าย เพื่อให้ได้ค่าประสิทธิภาพตามที่ต้องการ สุดท้ายผลลัพธ์ต่างๆ ที่ได้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการคำนวณค่าประสิทธิภาพของโทเคนบัส (token-bus) แบบ IEEE 802.4 ได้ ภายใต้เงื่อนไขเดียวกันกับที่ใช้ในงานวิจัยนี้ อย่างไรก็ตามแบบจำลองนี้ ไม่สามารถนำไปใช้สำหรับคำนวณค่าทราฟฟิคของเครือข่ายเอพดีไอ ในสถานะที่ลักษณะการกระจายของการส่งผ่านข้อมูลต่อสถานีในแต่ละคลาส นั้นมีความแตกต่างกันได้ เนื่องจากแบบจำลองที่ได้มา อยู่ภายใต้สมมติฐานที่ว่าลักษณะการกระจายของการส่งผ่านข้อมูลต่อสถานีในแต่ละคลาสนั้นเหมือนกัน ซึ่งสมมติฐานนี้จะไม่เป็นจริงในสถานะที่สถานีที่ต่างกัน มีค่าจำนวนของคลาสที่ได้รับความสำคัญ มีจำนวนต่างกัน

ในการพิจารณาความสามารถในการรองรับการส่งผ่านข้อมูล (Traffic Handling Capability) ของระบบเครือข่ายนั้น (Chang *et al.*, 1994) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับระบบสื่อสารแบบ CDMA ซึ่งมีความน่าสนใจ โดยเฉพาะกับระบบสื่อสารแบบไร้สาย และบรอดแบนด์เซอร์วิส เนื่องจากความสามารถทางด้าน การเข้าใช้ช่องสัญญาณ (Multiple Access) นั้นไม่ซับซ้อนและฟิเจอร์อื่นๆ อีกมากมาย ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา การตรวจสอบความสามารถในการรองรับการส่งผ่านข้อมูล ของเครือข่ายที่มีการให้บริการเซอร์วิสหลากหลายประเภท โดยเลือกพิจารณา ระบบสื่อสารบรอดแบนด์ไร้สายภายในอาคาร ซึ่งที่รองรับการส่งผ่านข้อมูลความเร็วสูง และเข้าช่องสัญญาณแบบ CDMA ผลลัพธ์ของงานวิจัยจะได้จาก การจำลองการทำงานในลักษณะ สภาพแวดล้อมแบบภายในอาคาร และใช้ความเร็วของข้อมูลในย่านบรอดแบนด์ ในเครือข่ายแบบ ATM-SONET ประสิทธิภาพของระบบจะถูกวัดในรูปของ ค่า Call Blocking Probability ค่า Dropping Probability ผลกระทบต่อความหนาแน่นของสถานี ค่าโหลดของการส่งข้อมูล ค่าเวลาเฉลี่ยของ Holding Time และการรองรับแหล่งข้อมูลที่หลากหลายได้ของระบบ

การสื่อสารไร้สายเป็นมีการใช้งานอย่างกว้างขวางในเวลาอันรวดเร็ว มีแอปพลิเคชันที่มีศักยภาพอยู่มากมาย ระบบการสื่อสารไร้สายในอนาคตที่สร้างเพื่อการใช้งานภายในอาคาร นั้นถูกคาดหวังให้สามารถรองรับการบูรณาการของการบริการ ทั้งทางด้านเสียง ข้อมูล และวิดีโอ การออกแบบระบบสื่อสารไร้สายนั้น จึงขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยเช่น คุณลักษณะของการขนส่งข้อมูล ความหนาแน่นของผู้ใช้ ค่าแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณ วิธีการเข้าใช้ช่องสัญญาณ และการวัดค่าประสิทธิภาพ เป็นต้น ในส่วนของการพิจารณาทางด้าน วิธีการเข้าใช้ช่องสัญญาณนั้น CDMA เป็นเทคนิควิธีที่น่าสนใจเนื่องจาก ความสามารถทางด้าน การย้ายข้ามเซลล์แบบ Soft Handoff และการให้จำนวนช่องสัญญาณสำหรับผู้ใช้งานแบบเสียงที่ค่าสูง แต่กระนั้นปัญหาหลักๆ ของ CDMA ที่พบเจอในทางปฏิบัติก็คือ ปัญหาทางด้าน Multipath Fading และ สัญญาณรบกวน สำหรับการ

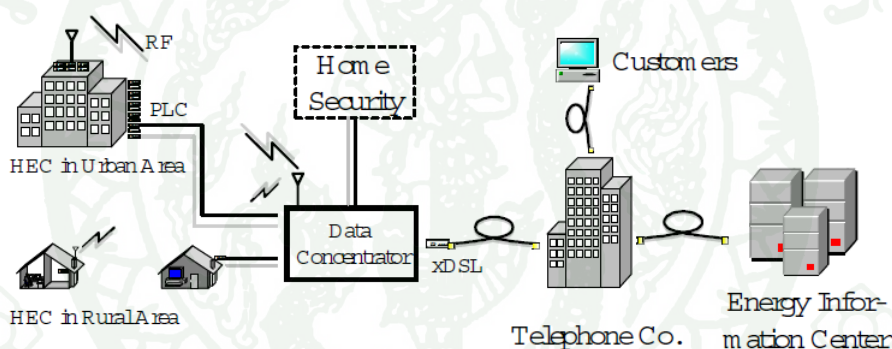
ประเมินความสามารถในการรองรับการส่งผ่านข้อมูล ออกมาเป็นค่า traffic handling capability ของระบบสื่อสารแบบไร้สายภายในอาคารแบบ CDMA นั้น ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการจำลองการทำงาน เพื่อศึกษาค่าดังกล่าวของระบบ โดยนำเสนอโมเดลของระบบ CDMA เพื่อให้เข้าใจการเข้าสู่สัญญาณแบบ CDMA ให้มากขึ้น ทั้งในเรื่องของการคำนวณค่าแบนด์วิดท์ การเข้ารหัสแบบ Spread Spectrum และการพิจารณาเรื่องสัญญาณรบกวน จากนั้นศึกษาถึงลักษณะเฉพาะของสัญญาณเรดิโอ โดยสามารถคำนวณหาค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนในลักษณะต่างๆ ได้ จึงนำข้อมูลค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้น มาพิจารณาการเข้าใช้ช่องสัญญาณแบบ CDMA และลักษณะเฉพาะของสัญญาณเรดิโอ มาสร้างเป็นแบบจำลองการส่งผ่านข้อมูลของช่องสัญญาณ (Traffic Model) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองการทำงานพบว่าระบบสื่อสารไร้สายภายในอาคารเข้าใช้ช่องสัญญาณแบบ CDMA ส่งผ่านข้อมูลความเร็วย่านบรอดแบนด์ นี้ ระบบมีศักยภาพไม่สูงมาก สำหรับที่จะรองรับ การส่งผ่านข้อมูลในปริมาณมากๆ ในเทอมของประสิทธิภาพที่ยอมรับได้ กล่าวคือสามารถนำระบบนี้ไปใช้งานกับการขนส่งข้อมูล ที่ต้องการแบนด์วิดท์สูงๆ ได้ แต่จะได้ค่าประสิทธิภาพที่ต่ำ ทั้งนี้การปรับปรุงการใช้งาน สามารถทำได้ด้วยเทคนิควิธีควบคุมกำลังส่ง หรือการใช้สายอากาศแบบ Sectored Antennas ก็จะสามารถทำให้ค่าประสิทธิภาพสูงขึ้น และสามารถเป็นตัวเลือกหนึ่งได้ เมื่อเทียบกับเทคโนโลยีระบบอื่นๆ

การพิจารณาการเชื่อมต่อการส่งผ่านข้อมูลมายังอุปกรณ์ DCU (Data Concentrator Unit) สำหรับการใช้งานเครือข่ายบรอดแบนด์การจัดการข้อมูลการใช้พลังงาน (Broadband Energy Information Network) (Yute *et al.*, 2003) ได้ทำการศึกษา การออกแบบระบบควบคุมการจัดการพลังงานภายในบ้าน (Home Energy Controllers : HECs) ให้มีความเชื่อถือได้และความคล่องตัว เนื่องจาก HECs นี้เป็นหัวใจสำคัญของ ระบบเครือข่ายข้อมูลการจัดการพลังงาน Energy Information Network System (ENIS) งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการเข้าใช้ช่องสัญญาณของอุปกรณ์ DCU แบบลูกผสม (hybrid channel data concentrator) เพื่อให้ได้การควบคุมและเข้าใช้งาน ผ่านระบบอินเทอร์เน็ตอย่างมีความน่าเชื่อถือ อุปกรณ์ DCU แบบลูกผสมที่งานวิจัยนี้พิจารณา ประกอบด้วยชุดระบบสื่อสาร PLC และมีโมดูลแบบไร้สายเชื่อมต่ออยู่ การเลือกใช้ระบบสื่อสารระหว่าง PLC หรือการสื่อสารแบบไร้สายผ่านสัญญาณเรดิโอ ขึ้นอยู่กับวิธีการประมาณค่าของความเชื่อถือได้ของช่องสัญญาณ ซึ่งในการตรวจสอบยืนยันค่าความเชื่อถือได้นี้ของระบบ จะต้องทำการทดสอบประสิทธิภาพของการเชื่อมต่อด้วยวิธีทดสอบ Line-Spread and Radial-Spread Test

ระบบ Energy Information Network System (EINS) นั้นใช้สำหรับเป็นเซิร์ฟเวอร์ สำหรับการส่งผ่านข้อมูลต่างๆ ทางด้านผู้ใช้ไฟฟ้า เช่น รายงานค่าไฟฟ้า ควบคุมหรือสั่งการอุปกรณ์ไฟฟ้า

ในบ้านจากระยะไกล หรือสามารถดูข้อมูลและประวัติการใช้ไฟฟ้าด้านต่างๆ ได้เป็นต้น จากภาพที่ 13 จะเห็นว่า ผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถเข้าถึงข้อมูลทางด้านการใช้พลังงาน หรือสามารถร้องขอบริการต่างๆ จากศูนย์ ENIS ได้ ดังนั้นจะเห็นว่า ENIS ไม่ใช่เป็นเพียงเครือข่ายขนาดใหญ่เท่านั้น แต่ยังมีความสามารถในการจัดสรรเซิร์ฟเวอร์ต่างๆ ทางด้านการใช้พลังงานให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้าได้ จึงเห็นได้ว่า DCU ทำหน้าเสมือนสะพานเชื่อมต่อข้อมูล ระหว่างเครือข่ายภายในบ้าน ที่เรียกว่า universal home network protocols กับการใช้งานผ่านเว็บไซต์แพลตฟอร์ม web-base management

โดยงานวิจัยนี้ใช้ Home Network protocols สำหรับโครงสร้างพื้นฐานของ DCU สำหรับการทดลองของงานวิจัยนี้ บนเน็ตเวิร์คอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง ENIS และในงานวิจัยนี้จะเฉพาะเจาะจงไปที่การออกแบบ การดำเนินการ และการทดสอบ ความเชื่อถือได้ของ DCU แบบลูกผสมที่ใช้งานได้ทั้งระบบสื่อสารแบบ PLC และระบบสื่อสารแบบไร้สาย



ภาพที่ 13 การใช้งานของระบบ ENIS

ที่มา: Yute et al. (2003)

การประเมินค่าความเชื่อถือได้ของช่องสัญญาณ ทำได้ด้วยการแบบ time-average method และต้องทำการกำหนดให้ ระบบสื่อสาร PLC เป็นระบบสื่อสารหลัก ในขณะที่ระบบสื่อสารแบบไร้สายเป็นระบบสื่อสารสำรอง ดังนั้นจุดติดตั้งมิเตอร์ของผู้ใช้ไฟฟ้าบางครัวเรือนที่ไม่สามารถใช้ระบบสื่อสารแบบ PLC ได้ก็จะสามารถเลือกไปใช้ระบบสื่อสารแบบไร้สายแทน จึงเห็นได้ว่าระบบโดยรวมจะมีพื้นที่ครอบคลุมการให้บริการ และความเชื่อถือได้สูงขึ้น สุดท้ายแล้วจุดมุ่งหมายหลักของงานวิจัยนี้คือ การออกแบบให้ระบบของ DCU มีความเชื่อถือได้คล่องตัวต่อการใช้งาน กู้ค่าต่อการลงทุน กะทัดรัด และเหมาะสม โดยสามารถเชื่อมต่อได้ทั้งเน็ต

เวิร์คอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง และเน็ตเวิร์คภายในบ้าน โดยผลการทดลองที่ได้ แสดงให้เห็นว่า มีความเป็นไปได้ที่จะนำ อุปกรณ์ DCU แบบลูกผสมนี้ มาปรับใช้ทั้งระบบสื่อสารแบบ PLC และระบบสื่อสารแบบไร้สาย สำหรับระบบ ENIS โดยยังให้ค่าความเชื่อถือได้อยู่ ทั้งในกรณีพื้นที่ที่มีความหนาแน่นของผู้ใช้สูง และพื้นที่ที่มีความหนาแน่นของผู้ใช้ต่ำ



การศึกษา การสร้างแบบจำลองสำหรับ ตรวจสอบประสิทธิภาพการส่งผ่านข้อมูล ของ ระบบสื่อสาร PLC

ในการศึกษาประสิทธิภาพการส่งผ่านข้อมูลของระบบสื่อสาร PLC นั้น ที่ผ่านมามีนักวิจัยหลายๆ ท่าน ศึกษาไว้ โดยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นไปที่การพิจารณาถึงผลกระทบ ที่เกิดจากสัญญาณรบกวน (Noise) และการรบกวนทางไฟฟ้า (Disturbance) ในสายไฟฟ้าระบบจำหน่าย ว่ามีผลต่อประสิทธิภาพการส่งผ่านข้อมูลของ PLC อย่างไร โดยได้นำทฤษฎีและโปรโตคอลต่างๆ ทางด้านระบบสื่อสาร มาใช้ในการสร้างโมเดลสำหรับจำลองการทำงาน ในสถานะต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลลัพธ์ประสิทธิภาพการส่งผ่านข้อมูลที่ได้ ในขณะที่งานวิจัยบางส่วนได้ทำการวิเคราะห์ความเหมาะสมของระบบสื่อสาร PLC สำหรับนำมาใช้ในการส่งข้อมูลแบบต่างๆ หรือนำมาใช้กับระบบที่งานวิจัยนั้นๆ ศึกษา โดยได้นำเสนอโมเดลในการจำลองการทำงาน และเทคนิควิธีในการปรับปรุงประสิทธิภาพของการส่งผ่านข้อมูลให้ดียิ่งขึ้น

มาตรฐานสำหรับระบบสื่อสาร PLC แบบ OFDM NB-PLC (ย่านความถี่ 9 kHz ถึง 500 kHz) นั้นใช้สำหรับรองรับการส่งข้อมูลสำหรับบริการต่างๆ เช่น ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า แก๊ส และบริการต่างๆ ของสมาร์ทมิเตอร์อิงอินฟราสตรัคเจอร์ โดยความมุ่งหวังของการสร้างมาตรฐาน เพื่อให้อุปกรณ์ต่างๆ ของระบบสื่อสาร PLC สามารถใช้งานร่วมกันได้ (interoperability) โดยกระบวนการของการสร้างมาตรฐานนั้น จะอยู่บนพื้นฐานของกระบวนการวิธีที่มีอยู่แล้ว การรวบรวมองค์ความรู้ การวิเคราะห์อันตรายของเทคโนโลยีระบบสื่อสาร PLC ของการให้บริการแอปพลิเคชันต่างๆ จำเป็นต้องพิจารณาถึง แมคคาไนซึม MAC ที่จะใช้ในการสร้างมาตรฐานของ NB-PLC ซึ่งสามารถใช้เกณฑ์ สำหรับพิจารณาประสิทธิภาพหลายๆ เกณฑ์ และอาจศึกษาเงื่อนไขทางด้านทราฟฟิก (traffic conditions) และโครงสร้างโทโปโลยี ที่แตกต่างกันของแต่ละสถานการณ์ในการทดลองได้

ในงานวิจัยการวิเคราะห์ผลกระทบของสัญญาณรบกวน และการรบกวนทางไฟฟ้า ต่อประสิทธิภาพการส่งผ่านข้อมูลของระบบสื่อสาร PLC (Vellano *et al.*, 2007) ได้พัฒนากระบวนการวิธีสำหรับตรวจสอบประสิทธิภาพของระบบสื่อสาร PLC โดยบันทึกเหตุการณ์การรบกวนทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น และเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวนในสายไฟฟ้า กับประสิทธิภาพการส่งผ่านข้อมูลของระบบสื่อสาร PLC และวินิจฉัยสาเหตุหลักของปัญหาสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น พร้อมทั้งนำเสนอเทคนิควิธีที่จะช่วยการันตีคุณภาพของเครือข่ายที่ใช้ ในงานวิจัยอีกเรื่องที่ศึกษาผลกระทบของการรบกวนทางไฟฟ้า ต่อประสิทธิภาพ PLC (Halid and AbdelFatteh, 2000) โดยพิจารณา

โปรโตคอล การเข้าใช้ช่องสัญญาณแบบ ALOHA และ Fixed Access เพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันของข้อมูล ซึ่งจะทำให้ได้คุณภาพการให้บริการของการส่งผ่านข้อมูล (QoS) ที่ดีขึ้น

โดยในงานวิจัยได้เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่แตกต่างกัน ของการจำลองส่งผ่านแพ็คเกจข้อมูลที่มีขนาดต่างๆ ทั้งในสถานะที่เครือข่าย ได้รับ และไม่ได้รับผลกระทบจากการรบกวนทางไฟฟ้า ของทั้งสองโปรโตคอล มีงานวิจัยที่พิจารณาการสร้างโมเดลสำหรับ สร้างการส่งข้อมูลของอุปกรณ์ในเครือข่าย PLC โดยใช้พื้นฐานของโมเดล MMFM (Markov Modulated Fluid Model) (Rocha *et al.*, 2011) เรียกว่าโมเดล MMFM with Traffic Autocorrelation Fitting นำโมเดลที่ได้ มาเปรียบเทียบกับปั๊วของโมเดล และปั๊วของโมเดลที่พัฒนามาจากทฤษฎี Markov Chain (Poisson Model Modulated by a Markov Chain : MMPP) จากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองการทำงานในแต่ละโมเดล มาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพ ในการส่งข้อมูลจริงในเครือข่าย PLC ที่สร้างขึ้น งานวิจัยที่ทำการวิเคราะห์ความเหมาะสมของระบบสื่อสาร PLC สำหรับนำมาใช้กับระบบ AMR (Automatic Meter Reading System) (Sivaneasan *et al.*, 2008) ได้นำเสนอโมเดลสำหรับวิเคราะห์ และศึกษาประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของสมาร์ตมิเตอร์ ในระบบ AMR ที่ใช้ระบบสื่อสาร PLC โดยพิจารณา ระบบ AMR สองรูปแบบคือ Clustered Simple Polling (CSP) และ Neighbor Relay Polling (NRP) ซึ่งทั้งสองวิธีการส่งนี้มีความสามารถในการจัดการปัญหา Silent Node ที่เกิดขึ้นในระบบ AMR ได้ดี ในการศึกษาจึงสร้างโมเดลจำลองโครงข่ายระบบสื่อสาร PLC โครงสร้างแบบต้นไม้ (Tree Topology) ซึ่งมีความเหมาะสมและใกล้เคียงกับสภาพการใช้งานจริง จากนั้นนำผลลัพธ์การจำลองการทำงาน มาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพระหว่างวิธีการส่งข้อมูลทั้งสองรูปแบบนี้ งานวิจัยที่ศึกษาการนำเทคนิค การเข้าใช้ช่องสัญญาณ แบบ Direct-Sequence Code Division Multiple Access (DS-CDMA) มาใช้ลดอัตราความผิดพลาด (Bit Error Rate : BER) ในการส่งข้อมูล เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพระบบสื่อสาร PLC (Liewkang and Banjankaprasert, 2011) โดยเทคนิค DS-CDMA นี้ ใช้โอควอลเลอร์แบบปรับค่าได้ ซึ่งพัฒนามาจากตัวกรองแบบ Laguerre จากนั้นสร้างโมเดลเพื่อจำลองการทำงาน และศึกษาความสามารถในการลดอัตราความผิดพลาดในการส่งข้อมูล ทั้งจากสาเหตุสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ (Impulse Noise) และปัญหา Multipath Fading ในช่องสัญญาณ PLC

ทั้งนี้จะเห็นว่าในการศึกษาของงานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมามีวัตถุประสงค์และลักษณะเฉพาะของการศึกษา รวมทั้งโมเดลที่นำเสนอ ที่แตกต่างกัน จึงทำให้ไม่สามารถนำผลลัพธ์ของงานวิจัยเหล่านี้ มาใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการส่งผ่านข้อมูลของระบบสื่อสาร PLC สำหรับอุปกรณ์สื่อสารปลายทางในระบบสมาร์ตกริดของ กฟภ. ได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้สร้างโมเดลจาก

มาตรฐาน PRIME ของ PLC ย่านความถี่ปานกลาง ใช้รูปแบบการควบคุมการเข้าใช้ช่องสัญญาณแบบ CSMA/CA และ TDM โดยออกแบบโปรแกรมให้สามารถปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อหาค่าประสิทธิภาพการส่งผ่านข้อมูลในสภาวะต่างๆ และนำไปพิจารณาความเหมาะสม ในการนำ PLC มาใช้กับระบบสื่อสารปลายทาง สำหรับสมาร์ทกริด ของ กฟภ. ต่อไป



อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

อุปกรณ์

วัสดุอุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับงานวิจัยนี้ประกอบด้วย

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
2. โปรแกรมสำเร็จรูป ที่ใช้ร่วมกันได้กับ Matlab
3. โปรแกรมช่วยจัดการเอกสาร Microsoft Office
4. โปรแกรมสำหรับออกแบบกระบวนการต่าง Microsoft Visio 6
5. โปรแกรม Math Type สำหรับเขียนสมการในบทความ

วิธีการทดลอง

แบบจำลองของระบบ

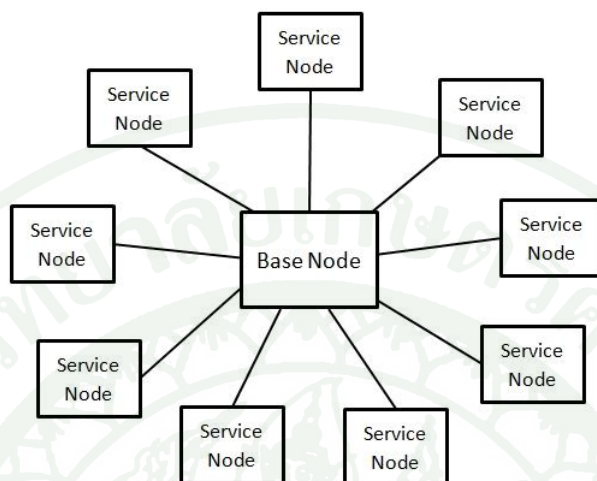
งานวิจัยสร้างโปรแกรมแบบจำลอง โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ร่วมกันได้กับ Matlab โดยโปรแกรมที่ได้ ใช้จำลองการทำงาน การรับ/ส่งข้อมูล ระหว่างสมาร์ทมิเตอร์ในเครือข่าย กับ อุปกรณ์ DCU ซึ่งทำหน้าที่รวบรวมข้อมูลเพื่อส่งต่อไปยัง โครงข่ายแอคเซสของเครือข่ายหลัก ใช้ระบบสื่อสาร PLC ในย่านความถี่ปานกลาง (9-500 kHz) มาตรฐาน PRIME ซึ่งใช้มาตรฐาน IEEE802.16 ในการควบคุมการเข้าใช้ช่องสัญญาณ (Multiple Access Protocols) แบบ CSMA/CA ร่วมกับแบบ TDM (Time Division Multiplex) โดยออกแบบให้แบบจำลองสามารถสร้างสถานการณ์การส่งข้อมูลโดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เมื่อทำจำลองจะสามารถคำนวณหาจำนวนสมาร์ทมิเตอร์สูงสุด ที่ระบบสามารถรองรับได้โดยไม่เกิดความคับคั่งของช่องสัญญาณ และคำนวณค่าทราฟฟิคที่อุปกรณ์ DCU ซึ่งเป็นค่าประสิทธิภาพการส่งผ่านข้อมูลของระบบได้

แบบจำลองจะสร้างโครงข่ายระบบสื่อสารปลายทาง จุดเชื่อมต่อบนสายจำหน่ายแรงดันต่ำ ระหว่างสมาร์ทมิเตอร์แต่ละตัวที่อยู่ภายใต้หม้อแปลงไฟฟ้าเดียวกัน เชื่อมต่อมายัง DCU ซึ่งตามมาตรฐาน PRIME จะใช้การเชื่อมต่อแบบโครงสร้างต้นไม้ ทั้งนี้ในงานวิจัยจะกำหนดให้การเชื่อมต่อระหว่างสมาร์ทมิเตอร์แต่ละตัวกับ DCU เป็นการเชื่อมต่อแบบ One-to-Many เพื่อลดความซับซ้อนในการเขียนโปรแกรมแบบจำลอง โดย DCU ทำหน้าที่เป็น Base Node ซึ่งมีเพียงตัวเดียวในโครงข่าย และสมาร์ทมิเตอร์แต่ละตัวเป็น Service Node สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 14

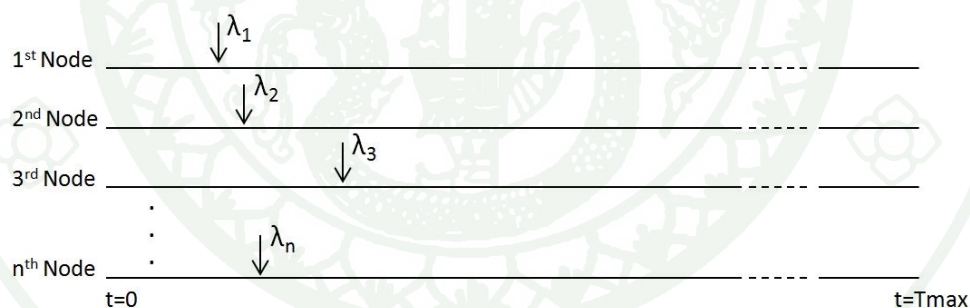
แบบจำลองการหาค่าประสิทธิภาพการส่งผ่านข้อมูลของระบบสื่อสาร PLC ที่ได้ ผู้ใช้สามารถที่จะกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ดังนี้

1. จำนวนสมาร์ทมิเตอร์ทั้งหมดในระบบ : n (ตัว)
2. ขนาดข้อมูลที่ต้องการส่ง : Data Size (KBytes)
3. ความถี่ในการส่งข้อมูลของสมาร์ทมิเตอร์: λ (ครั้ง/นาที)
4. อัตราเร็วข้อมูลของช่องสัญญาณ : Data Rate (Kbps)

โปรแกรมจะอ่านค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ เพื่อสู่ค่าการส่งข้อมูล แบบปัวซอง ได้ผลลัพธ์ดัง
ภาพที่ 15



ภาพที่ 14 การเชื่อมต่อระหว่างสมาร์ทมิเตอร์กับ DCU แบบ One-to-Many



ภาพที่ 15 การสู่ค่าความต้องการส่งข้อมูลของแต่ละ Node

โปรแกรมจะนำค่าสู่ความต้องการส่งข้อมูลของแต่ละ Node มาผ่านขั้นตอนการเซนส์ช่องสัญญาณ และส่งข้อมูลตามโปรโตคอล CSMA/CA โดยข้อกำหนดในการสร้างการเข้าช่องสัญญาณแบบ CSMA/CA ของแบบจำลองในงานวิจัยนี้ กำหนดให้

1. สมาร์ทมิเตอร์ จะได้รับการส่งค่าตอบรับ (Acknowledge) จาก DCU เสมอ
2. ไม่มีการปรับค่าขนาดคอนเทนชันวินโดวส์ (Contention Windows)

3. แพ็คเก็ตข้อมูลจะสูญหาย จากการชนกันของข้อมูลเท่านั้น

จากนั้นแบบจำลองจะนำค่าพารามิเตอร์ขนาดข้อมูลที่แต่ละ Node ใช้ในการส่ง มาสร้างเป็น Generic PDU ซึ่งเป็นโครงสร้างเฟรมแพ็คเก็ตเกิดใน MAC Layer ของมาตรฐาน PRIME กำหนดเป็นระยะเวลาที่ Node ใช้ในการส่งข้อมูล ได้เป็นค่า H (หน่วยวินาที) ดังสมการ (3) และสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 16

$$H = \frac{[3 \text{ byte} + (1024 \text{ byte} \times \text{Data Size} \times 14) + 4 \text{ byte}] \times 8 \text{ bits}}{\text{Data Rate} \times 60 \text{ sec}} \quad (3)$$



ภาพที่ 16 ช่วงเวลาที่ Node ใช้ในการส่งข้อมูล

จากนั้นตรวจสอบแพ็คเก็ตข้อมูลที่ถูกชนของแต่ละ Node เพื่อส่งข้อมูลซ้ำใหม่ (Retransmit) เมื่อโปรแกรมทำจำลองจนครบเวลาที่กำหนด T_{max} (นาฬิกา) ก็จะได้อผลลัพธ์ของการส่งข้อมูลของทุก Node ออกมาดังภาพที่ 17

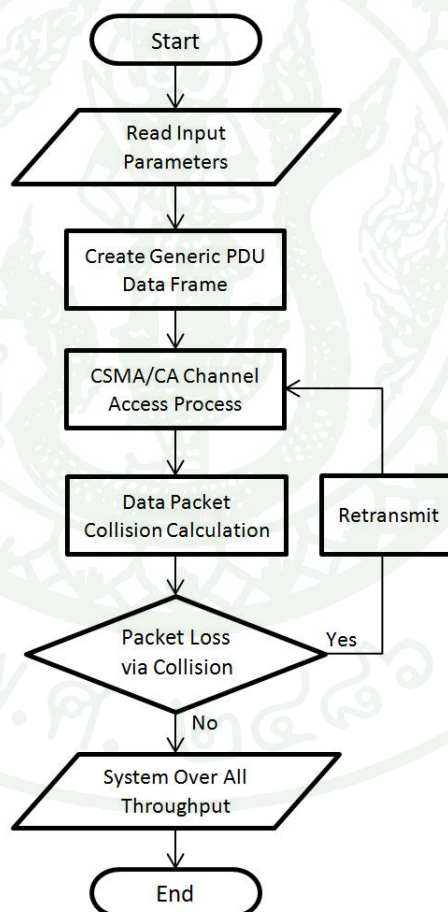


ภาพที่ 17 ผลลัพธ์ของการส่งข้อมูลของทุก Node ในระบบ

นำผลลัพธ์ที่ได้มาหาผลรวมของการส่งข้อมูลของทุกๆ Node ได้เป็นค่า Total Time (นาฬิกา) โปรแกรมจึงสามารถคำนวณค่าทฤษฎี Throughput (kbps) ของอุปกรณ์ DCU ซึ่งเกิดจากการส่งข้อมูลของทุกๆ Node ในระบบ หรือเป็นค่าประสิทธิภาพการส่งผ่านข้อมูลโดยรวมของระบบ (Over All System Performance) ได้ดังสมการ (4)

$$\text{Throughput} = \frac{\text{Total Time} \times \text{Data Rate}}{T_{\max}} \quad (4)$$

สำหรับการคำนวณหาจำนวนสมาร์ทมิเตอร์สูงสุด ที่ระบบสามารถรองรับได้โดยไม่เกิดความคับคั่งของช่องสัญญาณนั้น สามารถทำได้โดยการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อจำลองสภาวะการทำงานของระบบ (ขนาดแพ็คเกจข้อมูลในการส่ง ความถี่ในการส่งข้อมูลของแต่ละ Node อัตราเร็วของช่องสัญญาณ และระยะเวลาในการทำจำลอง) แล้วให้โปรแกรมทำการเพิ่มจำนวน Node ในระบบไปเรื่อยๆ เพื่อหาจุดที่ได้จำนวน Node สูงสุดที่ระบบสามารถรองรับได้ โดยไม่เกิดภาวะความคับคั่งของช่องสัญญาณ สามารถสรุปขั้นตอนการประมวลผลของโปรแกรมแบบจำลอง เป็น Flowchart ได้ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 Flowchart ขั้นตอนการประมวลผลของแบบจำลอง

การทำจำลองเปรียบเทียบจำนวนสมาร์ทมิเตอร์สูงสุดที่ระบบสามารถรองรับได้

ในการทดลองการทำงานของแบบจำลอง ได้พิจารณาจากข้อกำหนดของผู้ว่าจ้าง (Term of Reference : TOR) ในการจัดสรรสมาร์ทมิเตอร์ และอุปกรณ์ DCU มาใช้สำหรับระบบสมาร์ทกริดของ กฟภ. เป็นหลัก เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิจัยนี้ สามารถนำมาใช้เป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบระบบสื่อสารปลายทางสำหรับสมาร์ทกริดของ กฟภ. ได้ โดยในภาวะการทำงานปกติ สมาร์ทมิเตอร์แต่ละตัว จะต้องส่งข้อมูล Load Profile ซึ่งประกอบด้วยค่า Active Power (kW), Active Energy (kWh), Reactive Power (kVAR), Reactive Energy (kVARh), RMS Voltage, RMS Current, และค่า Power Factor ไปยังอุปกรณ์ DCU ในทุกๆ 15 นาที ซึ่งเป็นการส่งข้อมูลแบบรายคาบ

นอกจากนี้สมาร์ทมิเตอร์แต่ละตัว ต้องสามารถส่งข้อมูลแบบ On Demand ไปยังอุปกรณ์ DCU ได้ สำหรับสมาร์ทกริดแอปพลิเคชันที่ต้องการค่าแบบเรียลไทม์ เช่น ค่า Maximum kW Demand Rate, Cumulative kW Demand Rate, Total kWh หรือ Instantaneous Power Factor ไปยังระบบจัดการข้อมูลสมาร์ทมิเตอร์ (Meter Data Management System : MDMS) เพื่อประมวลผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ ซึ่งความต้องการใช้งานแอปพลิเคชันดังกล่าว ไม่สามารถคาดการณ์เวลาในการเกิดเหตุการณ์ได้ ดังนั้นแบบจำลองจึงสร้างการส่งข้อมูลลักษณะนี้ด้วยกระบวนการสุ่ม แบบปัวซอง ดังนั้นจึงออกแบบวิธีการทดลองเป็น 2 สถานการณ์ คือ

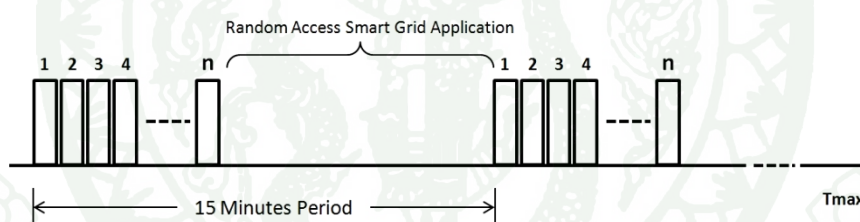
1. จำลองการส่งข้อมูล Load Profiles แบบรายคาบด้วยวิธี CSMA/CA
2. จำลองการส่งข้อมูล Load Profiles แบบรายคาบด้วยวิธี CSMA/CA ร่วมกับการส่งข้อมูลสมาร์ทกริดแอปพลิเคชันแบบสุ่มด้วยวิธี CSMA/CA

การปรับปรุงประสิทธิภาพการส่งข้อมูลด้วยเทคนิควิธี Scheduling Scheme

เนื่องจากการส่งข้อมูล Load Profiles แบบรายคาบ ร่วมกับการส่งข้อมูลสมาร์ทกริดแอปพลิเคชันแบบสุ่มนั้น ใช้การเข้าใช้ช่องสัญญาณแบบ CSMA/CA ตามมาตรฐาน PRIME ซึ่งถึงแม้ว่าเทคนิคการเข้าใช้ช่องสัญญาณแบบ CSMA/CA จะมีความเหมาะสมกับการส่งข้อมูลของแอปพลิเคชันที่มีความต้องการการรับ/ส่งแบบเรียลไทม์ แต่หากแพ็คเก็ตข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ หรือมี Node จำนวนมากในระบบ ต้องการส่งข้อมูลในเวลาเดียวกัน ก็จะทำให้โอกาสการชนกัน

ของข้อมูลมีสูงมากขึ้น จนทำให้มีการส่งข้อมูลซ้ำใหม่มากขึ้นเรื่อยๆ จนระบบเข้าสู่ภาวะคับคั่งของช่องสัญญาณในที่สุด

ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการปรับปรุงประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของสมาร์ตมิเตอร์ ในสถานะที่สมาร์ตมิเตอร์แต่ละตัวต้องส่งข้อมูล Load Profiles ร่วมกับการส่งข้อมูลสมาร์ตกริด แอปพลิเคชันแบบสุ่ม ให้ระบบสามารถรองรับจำนวนสมาร์ตมิเตอร์สูงสุด ก่อนเกิดภาวะคับคั่งของช่องสัญญาณได้มากขึ้น โดยงานวิจัยได้นำเสนอเทคนิควิธี Scheduling Scheme โดยเป็นการส่งข้อมูล Load Profiles ด้วยวิธี TDM ร่วมกับการส่งข้อมูลสมาร์ตกริดแอปพลิเคชันแบบสุ่มด้วยวิธี CSMA/CA กล่าวคือ ในทุกๆ รอบของเวลา 15 นาที จะให้สมาร์ตมิเตอร์แต่ละตัวส่งข้อมูล Load Profiles แบบ TDM เรียงลำดับต่อกันจนครบก่อน จึงจะเปิดโอกาสให้สมาร์ตมิเตอร์แต่ละตัว ส่งข้อมูลสมาร์ตกริดแอปพลิเคชันแบบสุ่มด้วยวิธี CSMA/CA ได้ ดังแสดงในภาพที่ 19 ซึ่งจะเห็นว่า แพ็คเก็ตข้อมูล Load Profiles จะไม่ถูกชนโดยแพ็คเก็ตข้อมูลสมาร์ตกริดแอปพลิเคชัน ทำให้สามารถการันตีการส่งข้อมูล Load Profiles ของสมาร์ตมิเตอร์ทุกตัวได้



ภาพที่ 19 การส่งข้อมูลของสมาร์ตมิเตอร์แบบ Scheduling Scheme

ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองการทำงาน การปรับปรุงประสิทธิภาพการส่งข้อมูล จะแสดงผล ในรูปของกราฟข้อมูลระหว่างค่าทศพุดต่อจำนวนสมาร์ตมิเตอร์ในระบบ เพื่อเปรียบเทียบกับ ผลลัพธ์การจำลองการส่งข้อมูล Load Profiles แบบรายคาบด้วยวิธี CSMA/CA ร่วมกับการส่งข้อมูล สมาร์ต กริดแอปพลิเคชันแบบสุ่ม ด้วยวิธี CSMA/CA

ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลการทดลอง

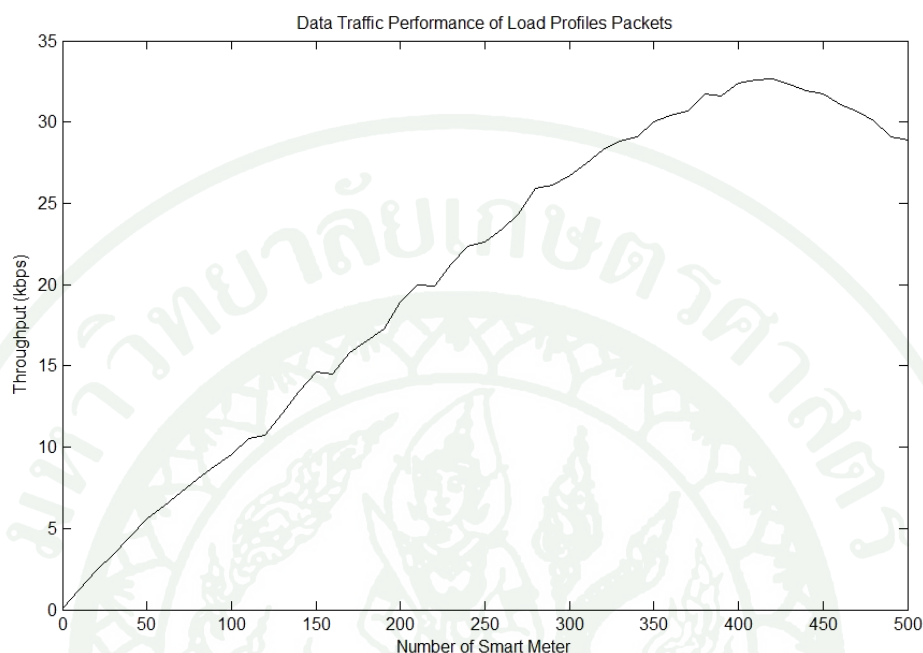
ผลการจำลองการส่งข้อมูล Load Profiles แบบระบายด้วยวิธี CSMA/CA

แบบจำลองให้สมรรถนะตัวในระบบ ส่งข้อมูล Load Profiles ขนาด 1 กิโลไบต์ ไปยังอุปกรณ์ DCU ทุกๆ 15 นาทีต่อครั้ง ด้วยอัตราข้อมูลของช่องสัญญาณ 128.6 กิโลบิตต่อวินาที ได้ผลลัพธ์ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการจำลองการส่งข้อมูล Load Profiles แบบระบายด้วยวิธี CSMA/CA

จำนวน สมรรถ มิเตอร์	ค่าทรูพุต (kbps)	จำนวน สมรรถ มิเตอร์	ค่าทรูพุต (kbps)	จำนวน สมรรถ มิเตอร์	ค่าทรูพุต (kbps)	จำนวน สมรรถ มิเตอร์	ค่าทรูพุต (kbps)
1	0.13	130	12.07	260	23.43	390	31.59
10	1.25	140	13.41	270	24.35	400	32.39
20	2.42	150	14.61	280	25.92	410	32.58
30	3.39	160	14.50	290	26.11	420	32.66
40	4.42	170	15.83	300	26.74	430	32.34
50	5.58	180	16.52	310	27.47	440	31.96
60	6.37	190	17.24	320	28.33	450	31.71
70	7.25	200	18.89	330	28.83	460	31.09
80	8.03	210	19.98	340	29.10	470	30.67
90	8.84	220	19.92	350	30.01	480	30.08
100	9.54	230	21.28	360	30.44	490	29.11
110	10.55	240	22.38	370	30.70	500	28.92
120	10.74	250	22.59	380	31.75		

ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าทรูพุตต่อจำนวนสมาร์ตมิเตอร์ในระบบ ได้ดังแสดงในภาพที่ 20



ภาพที่ 20 ค่าทรูพุตต่อจำนวนสมาร์ตมิเตอร์ของการส่งข้อมูล Load Profiles แบบรายคาบแบบ CSMA/CA

ได้ผลลัพธ์จำนวนสมาร์ตมิเตอร์สูงสุดในระบบ 420 ตัว ให้ค่าทรูพุตเท่ากับ 32.66 กิโลบิตต่อวินาที

ผลการจำลองการส่งข้อมูล Load Profiles แบบรายคาบด้วยวิธี CSMA/CA ร่วมกับส่งข้อมูลสมาร์ตกริดแอปพลิเคชันแบบสุ่ม ด้วยวิธี CSMA/CA

ในการทดลองจะใช้ข้อมูล 3 ชุดที่ค่าอินเทนซิตี (intensity) หรือความความหนาแน่นของการส่งข้อมูลเท่ากัน กล่าวคือการทำงานในแต่ละสถานะของข้อมูลทั้ง 3 ชุด จะมีค่าผลคูณระหว่างขนาดแพ็คเกจของข้อมูล และความถี่ในการส่งข้อมูล ($\text{Data Packet Size} \times \lambda$) เท่ากัน เพื่อเปรียบเทียบว่า ปัจจัยของการส่งข้อมูลที่มีความแตกต่างระหว่างขนาดแพ็คเกจของข้อมูลและความถี่ในการส่ง มีผลต่อค่าทรูพุตและจำนวนสมาร์ตมิเตอร์สูงสุดหรือไม่ อย่างไร

แบบจำลองให้สมาร์ทมิเตอร์ทุกตัวในระบบ ส่งข้อมูล Load Profiles ขนาด 1 กิโลไบต์ ไปยังอุปกรณ์ DCU ทุกๆ 15 นาทีต่อครั้ง (ส่งข้อมูลแบบรายคาบ) และส่งข้อมูลสำหรับสมาร์ทกริด แอปพลิเคชัน 3 ชุดที่ค่าอินเทนซิตี เท่ากัน ได้แก่

1. ข้อมูลชุดที่ 1 ส่งข้อมูลขนาด 15 กิโลไบต์ ด้วยการสุ่มที่ความถี่ 3 ครั้งต่อชั่วโมง มีค่า λ เท่ากับ 0.05 ครั้งต่อนาที
2. ข้อมูลชุดที่ 2 ส่งข้อมูลขนาด 30 กิโลไบต์ ด้วยการสุ่มที่ความถี่ 1.5 ครั้งต่อชั่วโมง มีค่า λ เท่ากับ 0.025 ครั้งต่อนาที
3. ข้อมูลชุดที่ 3 ส่งข้อมูลขนาด 45 กิโลไบต์ ด้วยการสุ่มที่ความถี่ 1 ครั้งต่อชั่วโมง มีค่า λ เท่ากับ 0.0167 ครั้งต่อนาที

ส่งข้อมูลด้วยอัตรา 128.6 กิโลบิตต่อวินาที การส่งข้อมูล Load Profiles และสมาร์ทกริด แอปพลิเคชันนั้น ใช้วิธีการเข้าใช้ช่องสัญญาณแบบ CSMA/CA ได้ผลลัพธ์เป็นค่าทรูพุตต่อจำนวนสมาร์ทมิเตอร์ดังตารางที่ 3 และได้ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การส่งข้อมูลซ้ำของ Load Profiles ดังตารางที่ 4 โดยเปอร์เซ็นต์การส่งข้อมูลซ้ำของ Load Profiles เป็นการคำนวณจากเฉพาะ ผลลัพธ์ของแพ็คเกจข้อมูล Load Profiles ที่สูญหายจากการถูกชนจึงทำให้ต้องมีการส่งข้อมูลซ้ำ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับจำนวนครั้งของการส่งข้อมูลทั้งหมด (จากการส่งข้อมูล Load Profiles ข้อมูลสมาร์ทกริด แอปพลิเคชัน และจากข้อมูลที่เป็นการส่งข้อมูลซ้ำ)

ตารางที่ 3 ผลการจำลองการส่งข้อมูล Load Profiles แบบรายคาบ ร่วมกับการส่งข้อมูลสมาร์ทกริด แอปพลิเคชันแบบสุ่ม ด้วยวิธี CSMA/CA – ข้อมูลค่าทรูพุตต่อจำนวนสมาร์ทมิเตอร์

จำนวน สมาร์ท มิเตอร์	ค่าทรูพุต (kbps)			จำนวน สมาร์ท มิเตอร์	ค่าทรูพุต (kbps)		
	ข้อมูล ชุดที่ 1	ข้อมูล ชุดที่ 2	ข้อมูล ชุดที่ 3		ข้อมูล ชุดที่ 1	ข้อมูล ชุดที่ 2	ข้อมูล ชุดที่ 3
1	1.81	2.53	3.25	56	31.48	30.24	26.60
2	2.97	3.65	4.91	57	31.10	29.95	25.99
3	3.29	5.11	6.93	58	29.91	29.07	26.60
4	4.21	6.60	8.04	59	30.90	29.43	25.86
5	5.65	7.65	9.32	60	30.63	28.67	26.38
6	6.71	9.34	10.96	61	30.67	28.63	25.66

ตารางที่ 3 (ต่อ)

จำนวน	ค่าทรูพุต (kbps)			จำนวน	ค่าทรูพุต (kbps)		
สมาร์ท	ข้อมูล	ข้อมูล	ข้อมูล	สมาร์ท	ข้อมูล	ข้อมูล	ข้อมูล
มิเตอร์	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	มิเตอร์	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3
7	8.19	10.83	12.45	62	30.18	28.51	25.29
8	9.73	13.66	15.82	63	29.39	27.30	24.06
9	10.87	14.90	17.15	64	29.73	27.63	24.33
10	12.27	16.79	23.11	65	29.41	27.05	23.52
11	12.61	16.81	24.19	66	28.89	27.07	22.48
12	13.84	17.40	25.38	67	28.02	27.34	22.49
13	15.15	17.69	25.83	68	28.76	26.78	21.65
14	15.35	18.03	26.58	69	28.49	24.19	21.97
15	16.57	21.27	27.21	70	28.63	25.16	20.70
16	16.79	20.97	28.49	71	27.84	24.91	20.07
17	18.30	22.66	29.19	72	27.59	24.75	19.69
18	18.21	24.19	32.05	73	26.55	24.69	19.42
19	20.23	25.00	32.94	74	26.85	23.45	18.99
20	21.87	25.25	32.29	75	25.52	22.46	18.95
21	22.30	25.72	32.67	76	24.67	22.37	18.57
22	22.77	26.15	33.44	77	24.46	22.33	17.78
23	24.01	27.34	34.61	78	24.55	22.14	18.95
24	23.25	27.57	35.78	79	24.26	21.67	19.17
25	24.19	29.12	35.40	80	24.84	22.77	19.20
26	23.85	28.74	34.84	81	24.84	22.03	18.79
27	24.24	29.43	35.83	82	24.55	21.83	18.01
28	25.05	29.98	35.19	83	23.63	21.63	18.27
29	25.47	29.52	36.01	84	24.46	20.53	17.15
30	26.40	30.67	36.43	85	22.95	21.33	16.43
31	26.47	31.15	36.90	86	22.59	20.68	15.87
32	26.91	31.80	37.49	87	23.52	20.39	15.78

ตารางที่ 3 (ต่อ)

จำนวน	ค่าทรูพุต (kbps)			จำนวน	ค่าทรูพุต (kbps)		
สมาร์ท	ข้อมูล	ข้อมูล	ข้อมูล	สมาร์ท	ข้อมูล	ข้อมูล	ข้อมูล
มิเตอร์	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	มิเตอร์	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3
33	27.05	31.81	38.01	88	23.18	20.28	15.80
34	27.14	32.27	38.43	89	22.17	19.87	15.37
35	26.67	32.56	38.95	90	22.39	20.26	14.95
36	27.43	32.31	39.24	91	22.23	19.54	14.50
37	27.68	32.83	38.21	92	21.83	19.20	14.04
38	28.96	33.33	37.60	93	22.53	18.72	14.41
39	28.33	33.91	37.47	94	22.57	19.42	13.89
40	29.07	34.70	35.94	95	22.17	18.32	13.91
41	29.53	34.32	36.37	96	21.63	19.85	13.64
42	29.68	33.85	36.05	97	21.15	19.56	14.27
43	29.97	33.37	35.53	98	20.86	18.59	14.47
44	29.75	34.25	35.13	99	21.38	18.43	13.59
45	30.04	33.53	34.83	100	21.83	17.78	13.44
46	29.73	33.15	34.29	110	20.95	16.54	11.17
47	29.46	33.10	32.99	120	20.30	15.21	10.87
48	29.05	33.03	32.52	130	18.84	14.43	9.41
49	30.06	32.52	31.53	140	18.99	14.27	8.31
50	30.27	31.82	30.61	150	17.85	11.89	6.75
51	30.61	32.27	30.31	160	15.96	10.49	6.42
52	31.03	31.93	28.27	170	14.67	9.64	5.54
53	30.65	30.81	27.41	180	13.17	8.53	4.86
54	31.71	31.51	27.27	190	11.95	8.20	4.23
55	31.98	30.70	26.67	200	11.39	7.21	3.58

ตารางที่ 4 ผลการจำลองการส่งข้อมูล Load Profiles แบบรายคาบ ร่วมกับการส่งข้อมูลสมาร์ทกริด
แอปพลิเคชันแบบสุ่ม ด้วยวิธี CSMA/CA – ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การส่งข้อมูลซ้ำของ Load
Profiles

จำนวน สมาร์ท มิเตอร์	เปอร์เซ็นต์ส่ง Load Profiles ซ้ำ			จำนวน สมาร์ท มิเตอร์	เปอร์เซ็นต์ส่ง Load Profiles ซ้ำ		
	ข้อมูล	ข้อมูล	ข้อมูล		ข้อมูล	ข้อมูล	ข้อมูล
	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3		ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3
1	0	0	0	56	6.07	6.52	7.24
2	0	0	0	57	6.24	6.45	7.04
3	0	0	0	58	6.33	6.66	6.83
4	0	0	0	59	6.42	6.74	7.49
5	0	1.15	1.44	60	6.42	6.91	7.38
6	0.93	1.21	1.80	61	6.69	7.06	7.47
7	1.21	0.93	1.61	62	6.55	6.98	7.57
8	1.45	1.32	1.95	63	6.68	7.19	7.74
9	1.52	1.57	2.03	64	6.72	7.12	7.23
10	1.97	2.11	2.05	65	6.47	7.20	7.72
11	2.24	1.72	2.22	66	6.83	7.55	7.81
12	2.44	2.27	2.47	67	6.77	7.31	8.24
13	2.39	2.31	2.31	68	6.98	7.51	7.96
14	2.33	2.44	2.70	69	6.81	7.42	8.03
15	2.45	2.73	2.97	70	6.90	7.63	8.12
16	2.62	2.89	3.03	71	6.79	7.78	8.21
17	2.81	3.06	3.17	72	6.94	7.74	8.35
18	2.72	2.70	3.10	73	7.02	7.25	8.49
19	3.00	3.15	3.34	74	7.05	7.44	8.23
20	3.27	3.31	3.59	75	7.23	8.05	8.44
21	3.28	3.31	3.68	76	7.28	8.00	8.57
22	3.36	3.54	3.80	77	7.32	8.27	8.48
23	3.45	3.43	3.86	78	7.44	8.14	8.63
24	3.44	3.78	3.65	79	7.46	8.33	8.72

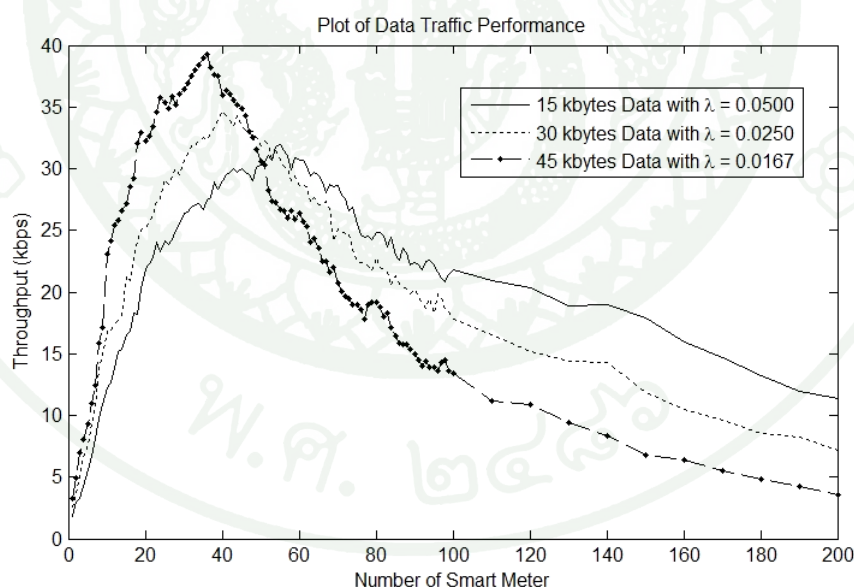
ตารางที่ 4 (ต่อ)

จำนวน สมาร์ท มิเตอร์	เปอร์เซ็นต์ส่ง Load Profiles ซ้ำ			จำนวน สมาร์ท มิเตอร์	เปอร์เซ็นต์ส่ง Load Profiles ซ้ำ		
	ข้อมูล	ข้อมูล	ข้อมูล		ข้อมูล	ข้อมูล	ข้อมูล
	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3		ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3
25	3.75	3.97	4.02	80	7.57	8.31	8.85
26	3.86	4.04	4.17	81	7.51	8.42	8.86
27	4.03	4.23	4.21	82	7.75	7.90	8.99
28	4.22	4.43	4.45	83	7.60	8.54	9.02
29	4.01	4.85	4.54	84	7.74	8.54	8.82
30	4.31	4.77	4.78	85	7.73	8.50	9.01
31	4.20	4.67	4.71	86	7.81	8.73	9.24
32	4.48	4.78	5.04	87	7.83	8.95	9.13
33	4.56	4.89	4.82	88	7.52	8.87	9.18
34	4.75	4.80	4.90	89	8.11	8.79	8.91
35	4.67	4.91	5.35	90	7.96	8.72	9.20
36	4.44	5.03	5.03	91	8.09	8.81	9.35
37	4.23	5.31	5.59	92	8.27	8.90	9.42
38	4.72	5.44	5.67	93	8.10	9.23	9.51
39	4.81	5.64	5.89	94	7.95	8.74	9.35
40	4.80	5.56	5.82	95	8.04	8.98	9.53
41	4.95	5.27	5.91	96	7.73	8.78	9.13
42	5.05	5.41	6.04	97	8.09	8.83	9.66
43	4.93	5.53	6.08	98	8.17	9.07	9.47
44	5.12	5.80	6.25	99	7.93	9.02	9.84
45	5.07	5.82	6.35	100	8.11	9.10	9.75
46	5.28	5.91	6.46	110	8.23	9.39	10.12
47	4.96	6.03	6.37	120	8.37	9.93	10.40
48	5.41	6.03	6.24	130	8.68	10.17	11.01
49	5.20	6.25	6.53	140	9.05	10.21	11.08
50	5.42	6.32	6.73	150	9.14	10.33	11.19

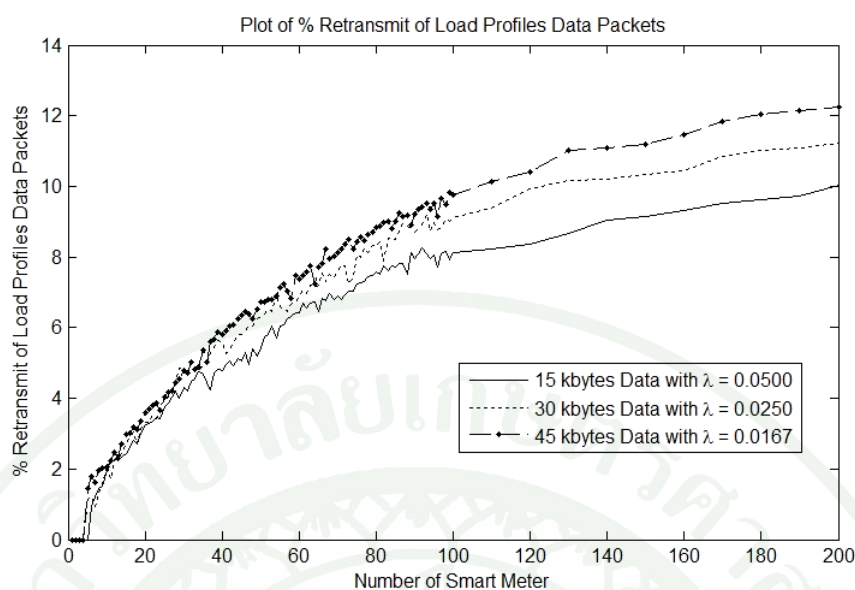
ตารางที่ 4 (ต่อ)

จำนวน สมาร์ต มิเตอร์	เปอร์เซ็นต์ส่ง Load Profiles ซ้ำ			จำนวน สมาร์ต มิเตอร์	เปอร์เซ็นต์ส่ง Load Profiles ซ้ำ		
	ข้อมูล ชุดที่ 1	ข้อมูล ชุดที่ 2	ข้อมูล ชุดที่ 3		ข้อมูล ชุดที่ 1	ข้อมูล ชุดที่ 2	ข้อมูล ชุดที่ 3
51	5.74	6.37	6.72	160	9.32	10.45	11.47
52	5.81	6.51	6.81	170	9.53	10.85	11.85
53	6.03	6.44	6.81	180	9.61	11.02	12.04
54	5.70	6.93	6.91	190	9.72	11.08	12.13
55	6.05	6.58	7.15	200	10.02	11.21	12.23

ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าทรูพุตต่อจำนวนสมาร์ตมิเตอร์ในระบบ ได้ดังแสดงในภาพที่ 21 และความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งข้อมูล Load Profiles ซ้ำต่อจำนวนสมาร์ตมิเตอร์ในระบบ ได้ดังภาพที่ 22



ภาพที่ 21 ค่าทรูพุตต่อจำนวนสมาร์ตมิเตอร์ ของการส่ง Load Profiles แบบรายคาบ ร่วมกับข้อมูลสมาร์ตกริดแอปพลิเคชันแบบสุ่ม ด้วยวิธี CSMA/CA



ภาพที่ 22 เปอร์เซนต์การส่งข้อมูล Load Profiles ซ้ำ ต่อจำนวนสมาร์ทมิเตอร์ในระบบ

ผลลัพธ์ของการส่งข้อมูลทั้ง 3 ชุดได้แก่ ข้อมูลชุดที่ 1 ได้จำนวนสมาร์ทมิเตอร์สูงสุด 55 ตัวที่ทราฟฟิค 31.98 kbps ข้อมูลชุดที่ 2 ได้จำนวนสมาร์ทมิเตอร์สูงสุด 40 ตัวที่ทราฟฟิค 34.70 kbps และข้อมูลชุดที่ 3 ได้จำนวนสมาร์ทมิเตอร์สูงสุด 36 ตัวที่ทราฟฟิค 39.24 kbps

สำหรับค่าเปอร์เซนต์การส่งข้อมูล Load Profiles ซ้ำ ต่อจำนวนสมาร์ทมิเตอร์ในระบบจะมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อจำนวนสมาร์ทมิเตอร์ในระบบเพิ่มสูงขึ้น

ผลการจำลองการปรับปรุงประสิทธิภาพการส่งข้อมูล ด้วยเทคนิควิธี Scheduling Scheme

การทำจำลองใช้เทคนิคการส่งข้อมูลแบบ Scheduling Scheme โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เหมือนกรณีการส่งข้อมูล Load Profiles ร่วมกับส่งข้อมูลสมาร์ทกริดแอปพลิเคชันแบบสุ่มด้วยวิธี CSMA/CA ได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการจำลองการปรับปรุงประสิทธิภาพการส่งข้อมูล ด้วยเทคนิควิธี Scheduling Scheme

จำนวน	ค่าทฤษฎี (kbps)			จำนวน	ค่าทฤษฎี (kbps)		
สมาร์ท	ข้อมูล	ข้อมูล	ข้อมูล	สมาร์ท	ข้อมูล	ข้อมูล	ข้อมูล
มิเตอร์	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	มิเตอร์	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3
1	1.40	1.90	2.21	56	53.74	68.50	81.72
2	3.40	5.52	5.61	57	53.08	69.06	77.31
3	5.29	4.39	8.29	58	55.49	61.92	80.76
4	6.49	7.34	10.81	59	55.06	68.32	80.42
5	8.19	9.25	13.17	60	53.53	66.77	78.71
6	6.73	11.11	12.76	61	58.35	66.54	80.65
7	10.31	12.59	18.19	62	55.45	69.87	76.42
8	11.55	14.79	17.82	63	57.18	69.04	81.05
9	10.63	16.58	21.65	64	56.84	67.19	80.29
10	13.39	17.59	23.52	65	58.73	74.52	81.57
11	16.43	19.59	25.65	66	54.93	68.82	79.88
12	14.97	23.88	28.22	67	60.21	74.43	81.21
13	18.39	21.13	27.03	68	59.90	73.30	79.39
14	19.92	23.23	32.74	69	61.90	75.72	79.63
15	18.91	26.24	35.76	70	59.34	76.38	78.04
16	21.36	27.46	34.07	71	61.29	73.04	80.06
17	22.64	28.88	36.97	72	59.95	76.44	80.65
18	19.94	27.95	35.67	73	62.04	74.22	78.96
19	23.65	29.34	41.67	74	63.03	79.04	79.83
20	21.40	31.97	39.76	75	64.44	79.81	78.46
21	24.21	35.19	44.38	76	61.41	75.77	80.29
22	25.18	33.93	42.67	77	63.63	72.40	79.34
23	23.81	32.29	47.48	78	64.36	76.98	80.33
24	26.58	38.36	50.70	79	63.84	74.16	80.60
25	29.25	41.82	46.29	80	62.76	74.72	81.05

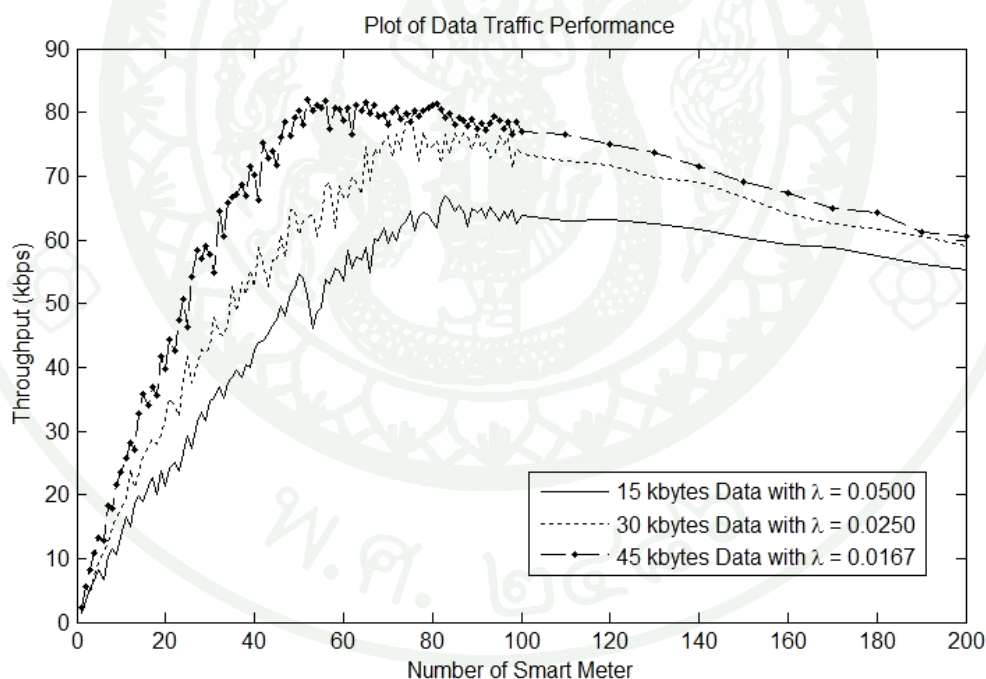
ตารางที่ 5 (ต่อ)

จำนวน	ค่าทรูพุต (kbps)			จำนวน	ค่าทรูพุต (kbps)		
สมาร์ท	ข้อมูล	ข้อมูล	ข้อมูล	สมาร์ท	ข้อมูล	ข้อมูล	ข้อมูล
มิเตอร์	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	มิเตอร์	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3
26	27.36	37.46	54.25	81	61.81	75.70	81.40
27	31.48	40.45	58.42	82	65.86	72.03	80.38
28	32.99	42.70	56.95	83	66.83	76.53	79.14
29	31.69	42.07	58.98	84	66.22	73.51	79.90
30	34.63	43.21	57.63	85	64.58	76.76	78.17
31	35.17	47.88	54.91	86	65.32	75.16	79.18
32	36.81	45.18	64.40	87	64.38	76.71	78.69
33	35.04	44.92	60.48	88	62.15	76.36	77.83
34	37.47	46.68	65.89	89	64.94	74.18	78.96
35	38.35	52.96	66.65	90	64.27	77.07	77.34
36	39.48	48.79	67.10	91	64.87	74.43	78.39
37	38.39	53.26	68.65	92	63.45	75.27	77.29
38	40.35	51.37	66.97	93	65.08	72.83	78.22
39	39.91	55.37	71.40	94	64.31	73.18	79.33
40	42.85	52.71	70.11	95	62.96	76.30	78.69
41	43.82	58.77	66.16	96	64.53	75.01	77.41
42	44.08	56.41	75.11	97	63.45	76.01	78.55
43	45.32	52.70	72.70	98	64.78	71.19	76.46
44	46.58	56.73	73.83	99	62.53	74.40	78.40
45	47.37	56.52	71.82	100	63.82	73.45	77.02
46	49.51	60.86	76.19	110	62.87	72.38	76.55
47	48.13	57.23	78.55	120	63.12	71.82	75.00
48	51.53	64.65	76.35	130	62.46	69.79	73.58
49	52.43	64.80	79.23	140	61.68	69.13	71.47
50	54.70	60.73	80.26	150	60.37	66.72	69.10
51	53.91	62.89	78.04	160	59.29	64.06	67.26

ตารางที่ 5 (ต่อ)

จำนวน สมาร์ท มิเตอร์	ค่าทราฟฟิค (kbps)			จำนวน สมาร์ท มิเตอร์	ค่าทราฟฟิค (kbps)		
	ข้อมูล ชุดที่ 1	ข้อมูล ชุดที่ 2	ข้อมูล ชุดที่ 3		ข้อมูล ชุดที่ 1	ข้อมูล ชุดที่ 2	ข้อมูล ชุดที่ 3
52	51.42	63.52	82.06	170	58.71	62.55	64.89
53	45.99	63.83	80.33	180	57.54	61.59	64.36
54	48.69	60.60	81.14	190	56.14	60.62	61.23
55	49.30	63.26	80.60	200	55.29	59.11	60.58

ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าทราฟฟิคต่อจำนวนสมาร์ทมิเตอร์ในระบบ ได้ดังแสดงในภาพที่ 23



ภาพที่ 23 ค่าทราฟฟิคต่อจำนวนสมาร์ทมิเตอร์ ของการส่งข้อมูลแบบ Scheduling Scheme

ผลลัพธ์ของการส่งข้อมูลทั้ง 3 ชุดได้แก่ ข้อมูลชุดที่ 1 ได้จำนวนสมาร์ทมิเตอร์สูงสุด 83 ตัวที่ทราฟฟิค 66.83 kbps ข้อมูลชุดที่ 2 ได้จำนวนสมาร์ทมิเตอร์สูงสุด 75 ตัวที่ทราฟฟิค 79.81 kbps และ ข้อมูลชุดที่ 3 ได้จำนวนสมาร์ทมิเตอร์สูงสุด 52 ตัวที่ทราฟฟิค 82.06 kbps สำหรับเปอร์เซ็นต์การส่ง

ข้อมูล Load Profiles ซ้ำ จะมีค่าเท่ากับศูนย์ เนื่องจากการส่งข้อมูลด้วยวิธี TDM ทำให้ไม่มีโอกาสการชนกันของข้อมูล Load Profiles

การพิจารณาผลลัพธ์ของการจำลองการส่งข้อมูลโดยใช้เกณฑ์พิจารณาจากค่าทรูพุตต่อจำนวนสมาร์ทมิเตอร์

นอกจากการใช้วิธีตัดสินภาวะคับคั่งของช่องสัญญาณจากสถานะที่การส่งผ่านข้อมูลของโหนดในเครือข่าย มีค่ามากกว่าความจุของช่องสัญญาณ โดยระบบให้ค่าทรูพุตสูงสุดที่เครือข่ายจะรับได้ ก่อนที่จะมีค่าลดลง จากภาวะความคับคั่ง เพื่อนำมาใช้เป็นเกณฑ์ตัดสินจำนวนสมาร์ทมิเตอร์สูงสุดที่ระบบสามารถรองรับได้แล้ว

ทั้งนี้ยังสามารถใช้เกณฑ์การพิจารณาหาจำนวนสมาร์ทมิเตอร์สูงสุดของระบบ ได้จากค่าทรูพุตต่อสมาร์ทมิเตอร์ โดยจะต้องมีค่ามากกว่าเกณฑ์ต่ำสุดที่ค่า 1.2 กิโลบิตต่อวินาที โดยค่าเกณฑ์ต่ำสุดนี้ เป็นค่าเฉลี่ยของขนาดแพ็กเก็ตเฟรมข้อมูล Generic PDU ของการส่ง Load Profiles ร่วมกับสมาร์ทกริดแอปพลิเคชันแบบสุ่ม ที่แต่ละ Node ส่งไปยัง DCU ในทุกๆ 15 นาที สามารถแสดงเกณฑ์การพิจารณาได้ดังสมการ (5)

$$\text{Throughput / Meters} > 1.2 \text{ Kbps} \quad (5)$$

จากการใช้เกณฑ์การพิจารณาหาจำนวนสมาร์ทมิเตอร์สูงสุด ด้วยค่าค่าทรูพุตต่อจำนวนสมาร์ทมิเตอร์ตามสมการ (5) ทำให้สามารถคำนวณหาจำนวนสมาร์ทมิเตอร์สูงสุด ของการจำลองการส่งข้อมูล Load Profiles แบบรายคาบด้วยวิธี CSMA/CA ร่วมกับส่งข้อมูลสมาร์ทกริดแอปพลิเคชันแบบสุ่ม ด้วยวิธี CSMA/CA ได้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการจำลองการส่งข้อมูล Load Profiles แบบรายคาบ ร่วมกับส่งข้อมูลสมาร์ทกริดแอปพลิเคชันแบบสุ่ม ด้วยวิธี CSMA/CA – ค่าทรูพุตต่อจำนวนสมาร์ทมิเตอร์

จำนวน	ค่าทรูพุต (kbps)			จำนวน	ค่าทรูพุต (kbps)		
สมาร์ท	ข้อมูล	ข้อมูล	ข้อมูล	สมาร์ท	ข้อมูล	ข้อมูล	ข้อมูล
มิเตอร์	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	มิเตอร์	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3
1	1.81	2.53	3.25	56	0.56	0.54	0.47

ตารางที่ 6 (ต่อ)

จำนวน สมาร์ท มิเตอร์	ค่าทรูพุต (kbps)			จำนวน สมาร์ท มิเตอร์	ค่าทรูพุต (kbps)		
	ข้อมูล ชุดที่ 1	ข้อมูล ชุดที่ 2	ข้อมูล ชุดที่ 3		ข้อมูล ชุดที่ 1	ข้อมูล ชุดที่ 2	ข้อมูล ชุดที่ 3
2	1.48	1.82	2.45	57	0.54	0.52	0.45
3	1.09	1.70	2.31	58	0.51	0.50	0.45
4	1.05	1.65	2.01	59	0.52	0.49	0.43
5	1.13	1.53	1.86	60	0.51	0.47	0.43
6	1.11	1.55	1.82	61	0.50	0.46	0.42
7	1.17	1.54	1.77	62	0.48	0.45	0.40
8	1.21	1.70	1.97	63	0.46	0.43	0.38
9	1.20	1.65	1.90	64	0.46	0.43	0.38
10	1.22	1.67	2.31	65	0.45	0.41	0.36
11	1.14	1.52	2.19	66	0.43	0.40	0.34
29	0.87	1.01	1.24	84	0.29	0.24	0.20
30	0.88	1.02	1.21	85	0.27	0.25	0.19
31	0.85	1.00	1.19	86	0.26	0.24	0.18
32	0.84	0.99	1.17	87	0.27	0.23	0.18
33	0.81	0.96	1.15	88	0.26	0.23	0.17
34	0.79	0.94	1.13	89	0.24	0.22	0.17
35	0.76	0.93	1.11	90	0.24	0.22	0.16
36	0.76	0.89	1.09	91	0.24	0.21	0.15
37	0.74	0.88	1.03	92	0.23	0.20	0.15
38	0.76	0.87	0.98	93	0.24	0.20	0.15
39	0.72	0.86	0.96	94	0.24	0.20	0.14
40	0.72	0.86	0.89	95	0.23	0.19	0.14
41	0.72	0.83	0.88	96	0.22	0.20	0.14
42	0.70	0.80	0.85	97	0.21	0.20	0.14
43	0.69	0.77	0.82	98	0.21	0.18	0.14
44	0.67	0.77	0.79	99	0.21	0.18	0.13

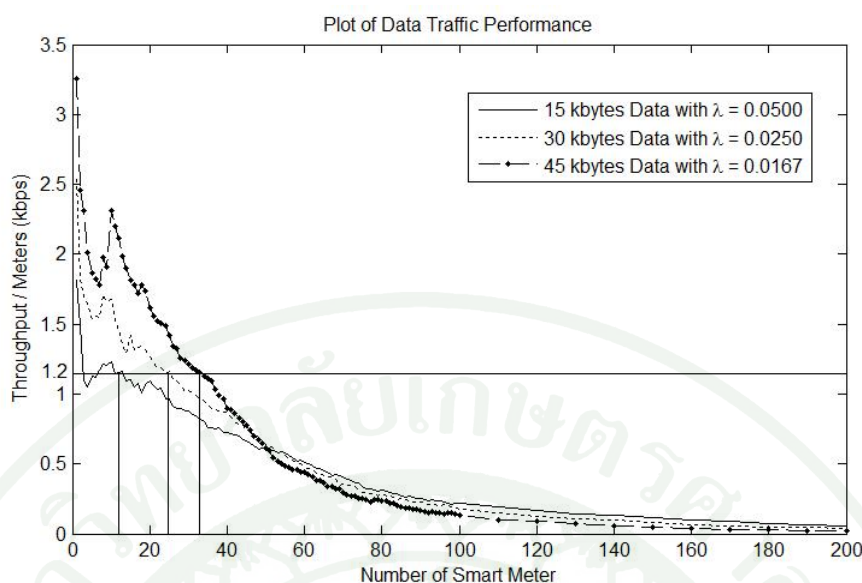
ตารางที่ 6 (ต่อ)

จำนวน สมาร์ท มิเตอร์	ค่าทรูพุต (kbps)			จำนวน สมาร์ท มิเตอร์	ค่าทรูพุต (kbps)		
	ข้อมูล ชุดที่ 1	ข้อมูล ชุดที่ 2	ข้อมูล ชุดที่ 3		ข้อมูล ชุดที่ 1	ข้อมูล ชุดที่ 2	ข้อมูล ชุดที่ 3
45	0.66	0.74	0.77	100	0.21	0.17	0.13
46	0.64	0.72	0.74	110	0.19	0.158	0.10
47	0.62	0.70	0.70	120	0.16	0.12	0.09
48	0.60	0.68	0.67	130	0.14	0.11	0.07
49	0.61	0.66	0.64	140	0.13	0.10	0.05
50	0.60	0.63	0.61	150	0.11	0.07	0.04
51	0.60	0.63	0.59	160	0.09	0.06	0.04
52	0.59	0.61	0.54	170	0.08	0.05	0.03
53	0.57	0.58	0.51	180	0.07	0.04	0.02
54	0.58	0.58	0.50	190	0.06	0.04	0.02
55	0.58	0.55	0.48	200	0.05	0.03	0.01

ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าทรูพุตต่อจำนวนสมาร์ทมิเตอร์ กับจำนวนสมาร์ทมิเตอร์ในระบบ ได้ดังแสดงในภาพที่ 24

โดยการพิจารณาจำนวนสมาร์ทมิเตอร์สูงสุดของระบบ ตามสมการ (5) จะได้ผลลัพธ์ของการส่งข้อมูลทั้ง 3 ชุดได้แก่ ข้อมูลชุดที่ 1 ได้จำนวนสมาร์ทมิเตอร์สูงสุด 10 ตัว ข้อมูลชุดที่ 2 ได้จำนวนสมาร์ทมิเตอร์สูงสุด 21 ตัว และข้อมูลชุดที่ 3 ได้จำนวนสมาร์ทมิเตอร์สูงสุด 30 ตัว

จากการใช้เกณฑ์การพิจารณาหาจำนวนสมาร์ทมิเตอร์สูงสุด ด้วยค่าค่าทรูพุตต่อจำนวนสมาร์ทมิเตอร์ตามสมการ (5) ทำให้สามารถคำนวณหาจำนวนสมาร์ทมิเตอร์สูงสุด ของการจำลองการปรับปรุงประสิทธิภาพการส่งข้อมูล ด้วยเทคนิควิธี Scheduling Scheme ได้ดังตารางที่ 7



ภาพที่ 24 ค่าทราฟฟิคต่อสมาร์ตมิเตอร์ กับจำนวนสมาร์ตมิเตอร์ของการส่งข้อมูล Load Profiles แบบรายคาบ ร่วมกับข้อมูลสมาร์ตกริดแอปพลิเคชันแบบสุ่ม ด้วยวิธี CSMA/CA

ตารางที่ 7 ผลการจำลองการส่งข้อมูล ด้วยเทคนิควิธี Scheduling Scheme – ค่าทราฟฟิค ต่อจำนวนสมาร์ตมิเตอร์

จำนวน สมาร์ต มิเตอร์	ค่าทราฟฟิค (kbps)			จำนวน สมาร์ต มิเตอร์	ค่าทราฟฟิค (kbps)		
	ข้อมูล ชุดที่ 1	ข้อมูล ชุดที่ 2	ข้อมูล ชุดที่ 3		ข้อมูล ชุดที่ 1	ข้อมูล ชุดที่ 2	ข้อมูล ชุดที่ 3
1	1.40	1.90	2.21	56	0.95	1.22	1.45
2	1.70	2.76	2.80	57	0.93	1.21	1.35
3	1.76	1.46	2.76	58	0.95	1.06	1.39
4	1.62	1.83	2.70	59	0.93	1.15	1.36
5	1.63	1.85	2.63	60	0.89	1.11	1.31
6	1.12	1.85	2.12	61	0.95	1.09	1.32
7	1.47	1.79	2.59	62	0.89	1.12	1.23
8	1.44	1.84	2.22	63	0.90	1.09	1.28
9	1.18	1.84	2.40	64	0.88	1.04	1.25
10	1.33	1.75	2.35	65	0.90	1.14	1.25

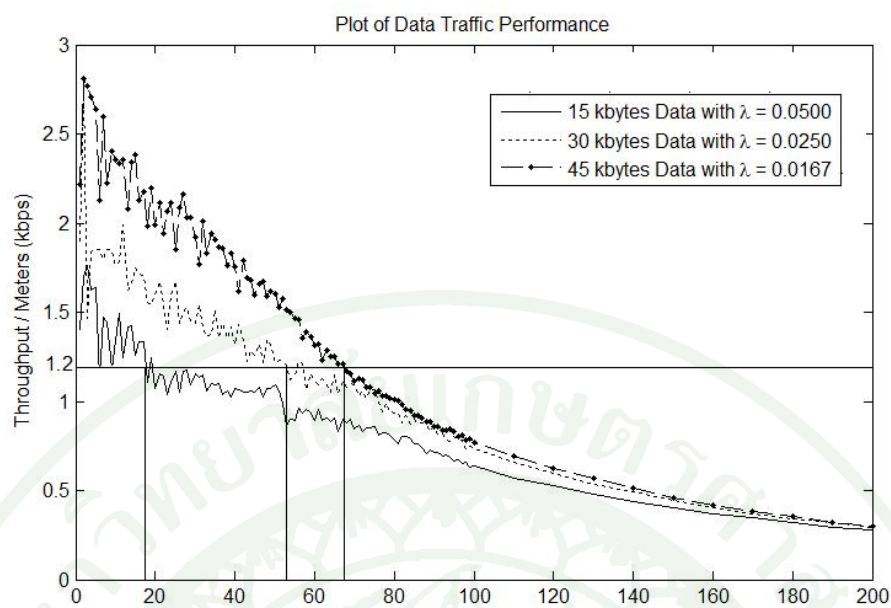
ตารางที่ 7 (ต่อ)

จำนวน สมาร์ท มิเตอร์	ค่าทรูพุต (kbps)			จำนวน สมาร์ท มิเตอร์	ค่าทรูพุต (kbps)		
	ข้อมูล ชุดที่ 1	ข้อมูล ชุดที่ 2	ข้อมูล ชุดที่ 3		ข้อมูล ชุดที่ 1	ข้อมูล ชุดที่ 2	ข้อมูล ชุดที่ 3
11	1.49	1.78	2.33	66	0.83	1.04	1.21
12	1.24	1.99	2.35	67	0.89	1.11	1.21
13	1.41	1.62	2.07	68	0.88	1.07	1.16
14	1.42	1.65	2.33	69	0.89	1.09	1.15
15	1.26	1.74	2.38	70	0.84	1.09	1.11
16	1.33	1.71	2.12	71	0.86	1.02	1.12
17	1.33	1.69	2.17	72	0.83	1.06	1.12
18	1.10	1.55	1.98	73	0.84	1.01	1.08
19	1.24	1.54	2.19	74	0.85	1.06	1.07
20	1.07	1.59	1.98	75	0.85	1.06	1.04
21	1.15	1.67	2.11	76	0.80	0.99	1.05
22	1.14	1.54	1.93	77	0.82	0.94	1.03
23	1.03	1.40	2.06	78	0.82	0.98	1.02
24	1.10	1.59	2.11	79	0.80	0.93	1.02
25	1.17	1.67	1.85	80	0.78	0.93	1.01
26	1.05	1.44	2.08	81	0.76	0.93	1.00
27	1.16	1.49	2.16	82	0.80	0.87	0.98
28	1.17	1.52	2.03	83	0.80	0.92	0.95
29	1.09	1.45	2.03	84	0.78	0.87	0.95
30	1.15	1.44	1.92	85	0.75	0.90	0.91
31	1.13	1.54	1.77	86	0.75	0.87	0.92
32	1.15	1.41	2.01	87	0.74	0.88	0.90
33	1.06	1.36	1.83	88	0.70	0.86	0.88
34	1.10	1.37	1.93	89	0.72	0.83	0.88
35	1.09	1.51	1.90	90	0.71	0.85	0.85

ตารางที่ 7 (ต่อ)

จำนวน สมาร์ท มิเตอร์	ค่าทรูพุต (kbps)			จำนวน สมาร์ท มิเตอร์	ค่าทรูพุต (kbps)		
	ข้อมูล ชุดที่ 1	ข้อมูล ชุดที่ 2	ข้อมูล ชุดที่ 3		ข้อมูล ชุดที่ 1	ข้อมูล ชุดที่ 2	ข้อมูล ชุดที่ 3
36	1.09	1.35	1.86	91	0.71	0.81	0.86
37	1.03	1.43	1.85	92	0.68	0.81	0.84
38	1.06	1.35	1.76	93	0.69	0.78	0.84
39	1.02	1.41	1.83	94	0.68	0.77	0.84
40	1.07	1.31	1.75	95	0.66	0.80	0.82
41	1.06	1.43	1.61	96	0.67	0.78	0.80
42	1.04	1.34	1.78	97	0.65	0.78	0.80
43	1.05	1.22	1.69	98	0.66	0.72	0.78
44	1.05	1.28	1.67	99	0.63	0.75	0.79
45	1.05	1.25	1.59	100	0.63	0.73	0.77
46	1.07	1.32	1.65	110	0.57	0.65	0.69
47	1.02	1.21	1.67	120	0.52	0.59	0.62
48	1.07	1.34	1.59	130	0.48	0.53	0.56
49	1.07	1.32	1.61	140	0.44	0.49	0.51
50	1.09	1.21	1.60	150	0.40	0.44	0.46
51	1.05	1.23	1.53	160	0.37	0.40	0.42
52	0.98	1.22	1.57	170	0.34	0.36	0.38
53	0.86	1.20	1.51	180	0.31	0.34	0.35
54	0.90	1.12	1.50	190	0.29	0.31	0.32
55	0.89	1.15	1.46	200	0.27	0.29	0.30

ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าทรูพุตต่อจำนวนสมาร์ทมิเตอร์ กับจำนวนสมาร์ทมิเตอร์ในระบบ ได้ดังแสดงในภาพที่ 25



ภาพที่ 25 ค่าทรูพุตต่อสมาร์ทมิเตอร์ กับจำนวนสมาร์ทมิเตอร์ ของการส่งข้อมูลแบบ Scheduling Scheme

โดยการพิจารณาจำนวนสมาร์ทมิเตอร์สูงสุดของระบบ ตามสมการ (5) จะได้ผลลัพธ์ของการส่งข้อมูลทั้ง 3 ชุดได้แก่ ข้อมูลชุดที่ 1 ได้จำนวนสมาร์ทมิเตอร์สูงสุด 19 ตัว ข้อมูลชุดที่ 2 ได้จำนวนสมาร์ทมิเตอร์สูงสุด 57 ตัว และข้อมูลชุดที่ 3 ได้จำนวนสมาร์ทมิเตอร์สูงสุด 67 ตัว

วิจารณ์

1. จากการจำลองสถานการณ์ที่ 1 การส่งข้อมูล Load Profiles แบบรายคาบด้วยวิธี CSMA/CA จะเห็นว่าผลลัพธ์กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าทรูพุตกับจำนวนสมาร์ทมิเตอร์นั้น ค่าทรูพุตจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อจำนวนสมาร์ทมิเตอร์ในระบบสูงขึ้น จนถึงภาวะคับคั่งของช่องสัญญาณ ได้ค่าทรูพุตของระบบสูงสุดจากนั้นค่าทรูพุตจึงค่อยๆ ลดลง

2. ในขณะที่การจำลองสถานการณ์ที่ 2 ให้สมาร์ทมิเตอร์ส่งข้อมูลทั้ง Load Profiles ร่วมกับข้อมูลสมาร์ทกริดแอปพลิเคชันแบบสุ่มแบบ CSMA/CA จะเห็นว่าผลลัพธ์กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าทรูพุตกับจำนวนสมาร์ทมิเตอร์นั้น ค่าทรูพุตที่เพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนสมาร์ทมิเตอร์เพิ่มขึ้น โดยเส้นกราฟจะมีความชันมากกว่าการจำลองสถานการณ์ที่ 1 แต่ก็จะมีแนวโน้มเช่นเดียวกันคือ เมื่อถึงภาวะคับคั่ง จะได้ค่าทรูพุตของระบบสูงสุด หลังจากนั้นค่าทรูพุตจะลดลง โดยมีอัตราการลดลงที่มากกว่าการจำลองสถานการณ์ที่ 1

3. ในการจำลองสถานการณ์ที่ 3 จำลองการปรับปรุงประสิทธิภาพการส่งข้อมูลด้วยเทคนิควิธี Scheduling Scheme จะเห็นว่าผลลัพธ์กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าทรูพุตกับจำนวนสมาร์ทมิเตอร์นั้น แนวโน้มของกราฟที่ได้จะใกล้เคียงกับผลการจำลองที่ 2 แต่จะได้ค่าทรูพุตสูงสุดที่จำนวนสมาร์ทมิเตอร์มากกว่า และให้ค่าทรูพุตสูงกว่า

4. การใช้ข้อมูลสมาร์ทกริดแอปพลิเคชัน 3 ชุด ทำให้ค่าอินเทนซิตีเท่ากัน แต่มีความถี่ในการส่งข้อมูลและขนาดของข้อมูลต่างกัน จะเห็นว่าแนวโน้มลักษณะของกราฟจะความคล้ายคลึงกัน แต่จะแตกต่างกันที่ค่าทรูพุตสูงสุดและจำนวนสมาร์ทมิเตอร์สูงสุด

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการทำจำลองส่งข้อมูล Load Profiles แบบรายคาบทุกๆ 15 นาที ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถรองรับสมาร์ตมิเตอร์ได้เป็นจำนวนมาก โดยสามารถรองรับได้สูงถึง 420 ตัว ในขณะที่เมื่อมีการทำจำลองให้สมาร์ตมิเตอร์ทุกตัวในระบบ ส่งข้อมูลสมาร์ตกริดแอปพลิเคชันแบบสุ่มร่วมกับภาวะการทำงานปกติที่ต้องส่งข้อมูล Load Profiles นั้น ระบบจะรองรับจำนวนสมาร์ตมิเตอร์สูงสุดได้ลดลง และเปอร์เซ็นต์การส่งข้อมูล Load Profiles ข้างที่สูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อจำนวนสมาร์ตมิเตอร์ในระบบสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าในสถานะเช่นนี้ การส่งข้อมูล Load Profiles อันเป็นหน้าที่หลักของสมาร์ตมิเตอร์นั้นขาดความเชื่อถือได้ อุปกรณ์ DCU มีโอกาสที่จะไม่ได้รับข้อมูล Load Profiles

จากการทดลองการปรับปรุงประสิทธิภาพการส่งข้อมูลด้วยเทคนิควิธี Scheduling Scheme จะเห็นได้ว่าระบบสามารถรองรับสมาร์ตมิเตอร์ได้มากขึ้น และเป็นการส่งข้อมูล Load Profiles ด้วยวิธี TDM จึงทำให้การันตีได้ว่าแพ็คเกจข้อมูลจะไม่มีโอกาสถูกชน การส่งข้อมูล Load Profiles ไปยัง DCU มีความน่าเชื่อถือได้ นอกจากนี้ จากการทดลองโดยการใช้ข้อมูล 3 ชุดที่แตกต่างกันแต่ให้ค่าอินเทนซิตีเท่ากัน ทำให้ได้ข้อสรุปว่า การส่งข้อมูลที่มีขนาดแพ็คเกจใหญ่ จะให้ค่าทรูพุตที่สูง แต่จะได้จำนวนสมาร์ตมิเตอร์สูงสุดน้อยกว่า การส่งข้อมูลที่มีขนาดแพ็คเกจที่เล็กกว่า

อภิปรายผล

การเข้าใช้ช่องสัญญาณแบบ CSMA/CA มีความเหมาะสมกับลักษณะการส่งข้อมูลที่มีความต้องการรับ/ส่ง ข้อมูลแบบเรียลไทม์ เช่นข้อมูลสมาร์ตกริดแอปพลิเคชัน แต่ CSMA/CA ก็มีข้อจำกัดเมื่อระบบมี Node จำนวนมากต้องการส่งข้อมูลพร้อมๆ กัน หรือแพ็คเก็ตข้อมูลที่ส่งมีขนาดใหญ่ จะทำให้โอกาสการชนกันของข้อมูลสูงขึ้น จนเข้าสู่ภาวะคับคั่งของช่องสัญญาณในที่สุด ผลลัพธ์ของการจำลองการส่งข้อมูล Load Profiles ร่วมกับส่งข้อมูลสมาร์ตกริดแอปพลิเคชันแบบกลุ่มที่ใช้วิธี CSMA/CA เพียงอย่างเดียว จึงทำให้ระบบสามารถรองรับจำนวนสมาร์ตมิเตอร์สูงสุดได้ลดลงเป็นอย่างมาก งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอเทคนิควิธี Scheduling Scheme ซึ่งใช้การส่งแบบ TDM ร่วมกับ CSMA/CA การจัดสรรไทม์สล็อตในการส่งของ TDM ทำให้หลีกเลี่ยงปัญหาการชนกันของข้อมูล จึงทำให้มั่นใจได้ว่าแพ็คเก็ตข้อมูล Load Profiles ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญและต้องการความเชื่อถือได้ในการขนส่ง จะไม่มีโอกาสถูกชน สามารถการันตีความเชื่อถือได้ในการส่งข้อมูล Load Profiles ไปยัง DCU ได้

งานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองหาค่าประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของระบบสื่อสาร PLC ที่งานวิจัยได้นำเสนอ สามารถนำมาใช้ในการจำลองการทำงานรับ/ส่งข้อมูล ของสมาร์ตมิเตอร์ไปยัง DCU ในเครือข่ายระบบสื่อสารปลายทางได้อย่างเหมาะสม โดยสามารถหาจำนวนสมาร์ตมิเตอร์สูงสุดที่ระบบสามารถรองรับโดยไม่เกิดภาวะคับคั่งของช่องสัญญาณได้ เพื่อหาคำตอบของการจำลองสถานการณ์ การรับ/ส่งข้อมูลแบบต่างๆ ได้ ทำให้สามารถนำข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง ไปใช้ในการวิเคราะห์ ออกแบบ โครงข่ายระบบสื่อสารปลายทางในระบบสมาร์ตกริดของ กฟภ. ได้

ข้อเสนอแนะ

สามารถพัฒนาโปรแกรมแบบจำลอง ให้มีความสามารถในการจำลองการทำงานให้ได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับการทำงานจริงมากขึ้นได้ ด้วยการเพิ่มฟังก์ชันสัญญาณรบกวนในช่องสัญญาณเพื่อใช้สำหรับจำลองการทำงาน ในพื้นที่ชุมชน ที่แตกต่างกัน สำหรับการนำแบบจำลองนี้ไปประยุกต์ใช้ในอนาคต ผู้ใช้สามารถนำข้อมูลการสำรวจพื้นที่ ที่จะติดตั้งสมาร์ทมิเตอร์ ว่ามีความหนาแน่นของครัวเรือนมากน้อยเพียงใด มาใช้เป็นข้อมูลในการกำหนดค่าจำนวนสมาร์ทมิเตอร์ และระดับสัญญาณรบกวนในแบบจำลอง ก็จะทำให้แบบจำลองสามารถคำนวณค่าได้แม่นยำมากขึ้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. 2553. รายงานความก้าวหน้าของเทคโนโลยี PLC ประจำปี 2553. 11.
- จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2553. รายงานการจ้างที่ปรึกษาจัดทำแผนที่นำทาง (Roadmap) และ ศึกษาความเหมาะสมโครงการ PEA Smart Grids และ AMI ฉบับที่ 3. 58.
- Amit, A., S. Kunta and P.K. Verma. 2010. A Proposed Communications Infrastructure for the Smart Grid. pp. 1-5. *In Innovative Smart Grid Technologies, ISGT*. Gaithersburg, Maryland.
- Behrouz, A.F. 2007. **Data Communications and Networking**. 4th ed. Mc Graw Hill, Singapore.
- Chang, G.Z., H.M. Hafez and D.D. Falconer. 1994. Traffic Handling Capability of a Broadband Indoor Wireless Network Using CDMA Multiple Access. **Selected Areas in Communications, IEEE Journal** 12 (4): 645-653.
- Dahmouni, H., H.E. Ghazi and S. Vaton. 2010. Data Traffic Performance Model for Cellular Networks. pp. 1-7. *In Communications and Networking (ComNet)*. Tozeur, Tunisia.
- Halid, H. and H. Abdelfatteh. 2000. Modeling MAC Layer for Powerline Communications Networks. pp. 70-81. *In Proceedings of SPIE No. 4211*.
- Jisun, L., D.K. Jung, Y. Kim, Y.W. Lee and Y.M. Kim. 2010. Smart Grid Solutions, Services, and Business Models Focused on Telco. pp. 323-326. *In Network Operations and Management Symposium Workshops (NOMS Wksp)*. Osaka, Japan.

- Liewkang, S. and C. Banjangkprasert. 2011. Performance Analysis of Power Line Communication Using DS-CDMA Technique with Adaptive Laguerre Filters. pp. 50-54. *In 2011 International Conference on Information and Electronics Engineering*. Bangkok.
- PRIME Alliance. 2012. **Draft Standard for PowerLine Intelligent Metering Evolution**.
PRIME Alliance. Available Source: <http://www.prime-alliance.org/technology.php>, Feb 3, 2012.
- Rocha, F.C., C.B. Santos and F.T. Vieira. 2011. Traffic Modeling in PLC Networks using a Markov Fluid Model with Autocorrelation Function Fitting. **TEMA Tend. Mat. Apl. Comput** 12 (3): 233-243.
- Sivaneasan, B., P.L. So and E. Gunawan. 2008. Modeling and Performance Analysis of Automatic Meter Reading Systems Using Power Line Communications. pp. 1446-1450. *In Communication Systems, 2008. ICCS 2008. 11th IEEE Singapore International Conference*. Singapore.
- Stefano, G., A. Scaglione and Z. Wang. 2010. Power Line Communications and the Smart Grid. pp. 303-308. *In Smart Grid Communications (SmartGridComm) 2010*. Gaithersburg, Maryland.
- Vellano, N.V., K.T. Soletto, P.R. Pimentel, L.S. Cesar, A.S. Baldissin, G.R. Silva, C.A. Cludi, C.F. Barbosa, R.B. Romano, A.A. Ribeiro, F.M. Araujo and A. Bagarolli. 2007. PLC Systems Performance Analysis Regarding Power Quality Disturbances. pp. 390-395. *In Power Line Communications and Its Applications 2007, IEEE International Symposium on*. Pisa, Italy.
- Virtamo, J. 2012. **38.3143 Queueing Theory / Poisson process**. Poisson-processi. Available Source: http://www.netlab.tkk.fi/opetus/s38143/luennot/E_poisson.pdf, Aug 14, 2012.

Wenpeng, L., D. Sharp and S. Lancashire. 2010. Smart Grid Communication Network Capacity Planning for Power Utilities. pp. 1-4. *In Smart Metering & Infrastructure Program at BC Hydro.*

Werahera, P.N. and A.P. Jayasumana. 1994. Fiber Distributed Data Interface: Throughput Evaluation with Multiple Classes of Traffic. **Communications IEEE Transactions** 42 (234): 499-510.

Yute, C., J.K. Hwang and S.M. Wu. 2003. A Reliable Power Line Carrier and Wireless Data Concentrator for Broadband Energy Information Network. **Consumer Electronics, IEEE Transactions** 49 (4): 1054-1060.

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นายกิตติวัฒน์ ศรีวิลาส
วัน เดือน ปี ที่เกิด	21 พฤศจิกายน 2521
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม
ประวัติการศึกษา	วศ.บ.(วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	วิศวกรระดับ 7 ประจำแผนกระบบสื่อสาร การไฟฟ้า ส่วนภูมิภาค เขต 3 ภาคกลาง จ.นครปฐม
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เขต 3 ภาคกลาง จังหวัดนครปฐม
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ได้รับทุนการศึกษาระดับปริญญาโท โครงการความร่วมมือทางวิชาการ และพัฒนาผู้เชี่ยวชาญสาขา วิศวกรรมไฟฟ้า ระหว่าง กฟภ. และ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2553)