



รายงานการวิจัย

การวัดและส่งข้อมูลทางไกลสำหรับความต้องการใช้กำลังงานไฟฟ้าโดยใช้การ
สื่อสารผ่านสายไฟฟ้า
(Telemetry for electrical power demand by using power line
communication)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การวัดและส่งข้อมูลทางไกลสำหรับความต้องการใช้กำลังงานไฟฟ้าโดยใช้การ
สื่อสารผ่านสายไฟฟ้า
(Telemetry for electrical power demand by using power line
communication)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

อ.ทศพล รัตนนิยมชัย

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2553

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กันยายน 2558

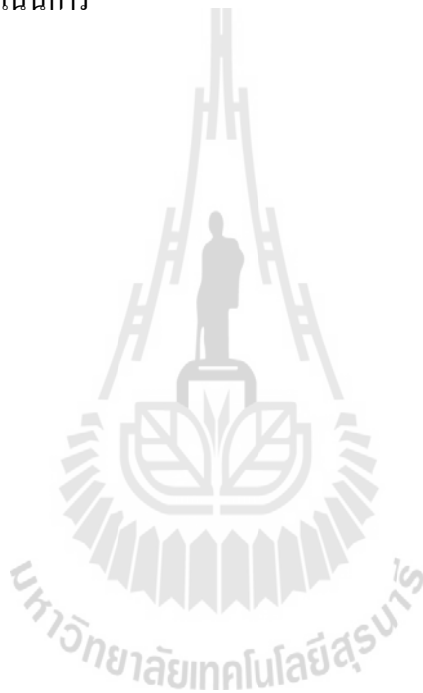
กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สามารถดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือและสนับสนุนจากผู้ร่วมงาน
ทุกท่านและหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง



บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาการสื่อสารผ่านสายไฟฟ้าสำหรับการวัดค่ากำลังไฟฟ้าจากระยะไกล ระบบนี้มีความสามารถในการส่งข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดไปยังคอมพิวเตอร์ส่วนกลางผ่านสายไฟฟ้า อุปกรณ์โมเด็ม PLC เป็นวงจรกรองสัญญาณความถี่สูงผ่านถูกออกแบบให้นำมาใช้เพื่อส่งและรับข้อมูลการวัดกำลังงาน โดยการส่งสัญญาณผสมเข้าไปในสายไฟฟ้าที่ส่งกำลังงานไฟฟ้าที่ความถี่ 50 Hz การควบคุมการส่งกำลังไฟฟ้าใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ถูกโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานของโมเด็ม PLC และการเชื่อมต่อต่าง ๆ เครื่องมือวัดที่ต่อเชื่อมกับ โมเด็มมีการระบุหมายเลขตำแหน่ง IP ที่เฉพาะตัว เพื่อแยกแยะอุปกรณ์นั้น ๆ ออกจากอุปกรณ์อื่นได้ การประเมินประสิทธิภาพผลของระบบที่นำเสนอใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ช่วยในการดำเนินการ



ABSTRACT

This research project presents a study of power line communication for electrical power telemetering. This system has a special capability of transmitting the measured values to a centralized computer via power lines. The PLC modem as a passive high-pass filter is designed for transmitting and receiving information. Its function is to send the information carrier together with transmitted data by superimposing it on the 50 Hz power frequency signal. A microcontroller is employed to function as the main processing of the modem. It is programmed for PLC control and interfacing with other devices. Each power meter, connected via a PLC modem, is assigned with a unique identification number (address) for distinguishing each device from one another. To evaluate the effectiveness of the proposed system, simulation through MATLAB/Simulink software was conducted.



สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	
2.1 กล่าวนำ.....	3
2.2 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	3
2.3 การทบทวนวรรณกรรมและสารสนเทศที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.4 สรุป.....	7
บทที่ 3 การสื่อสารข้อมูลผ่านสายส่งไฟฟ้า	
3.1 กล่าวนำ.....	8
3.2 โครงสร้างการสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบการควบคุมอัตโนมัติ.....	8
3.3 โมเด็มสื่อสารผ่านสายส่งไฟฟ้า.....	9
3.4 วงจรเชื่อมต่อ.....	9
3.5 การเข้ารหัสแบบเอฟเอสเค.....	11
3.6 การส่งสัญญาณเอฟเอสเค.....	11
3.7 การรับสัญญาณเอฟเอสเค.....	12
3.8 โปรโตคอลสำหรับการสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า.....	13
3.9 การรับส่งข้อมูลกับอุปกรณ์ภายนอก.....	17
3.10 สรุป.....	17
บทที่ 4 การออกแบบโมเด็มสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า	
4.1 กล่าวนำ.....	18

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 หลักการของโมเด็มสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า.....	18
4.3 การออกแบบชุดส่งสัญญาณข้อมูล.....	19
4.4 การออกแบบชุดรับสัญญาณข้อมูล.....	26
4.5 การหาค่าความถี่ของคลื่นความถี่พาหะที่เหมาะสม.....	29
4.6 การออกแบบวงจรเชื่อมต่อ.....	32
4.7 สรุป.....	35
บทที่ 5 ผลการทดสอบ	
5.1 กล่าวนำ.....	36
5.2 การจำลองสัญญาณข้อมูลอนุกรมแบบอะซิงโครนัส.....	36
5.3 การจำลองผลสำหรับการมอดูเลตสัญญาณข้อมูล.....	37
5.4 แบบจำลองวงจรเชื่อมต่อสำหรับการส่งสัญญาณและรับสัญญาณ.....	38
5.5 แบบจำลองสายส่งกำลังไฟฟ้าและสัญญาณรบกวน.....	40
5.6 การจำลองการดีมอดูเลตสัญญาณข้อมูล.....	41
5.7 ผลการทดลอง.....	42
5.8 สรุป.....	44
บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ	
6.1 สรุป.....	45
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	45
บรรณานุกรม	46
ภาคผนวก ก. ผลผลิตจากงานวิจัย	48

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 การกำหนดสถานะสัญญาณเอาต์พุตของวงจรจับสัญญาณ.....	23
ตารางที่ 4.2 ผลการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณ อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนค่าความถี่.....	30
ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการรับส่งสัญญาณข้อมูลต่อขนาดของสัญญาณรบกวน	42
ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการรับส่งสัญญาณข้อมูลต่อระยะทางส่ง.....	43
ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการรับส่งสัญญาณข้อมูลด้วย CRC.....	44



สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 การติดตั้งระบบ BPL กับระบบนำจ่ายไฟฟ้า.....	4
รูปที่ 3.1 โครงสร้างระบบการควบคุมแสงสว่างอัตโนมัติผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า.....	8
รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรม โครงสร้างของโมเดมสื่อสารผ่านสายส่งไฟฟ้า.....	9
รูปที่ 3.3 ผลตอบสนองของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน.....	10
รูปที่ 3.4 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมและแบบขนาน.....	10
รูปที่ 3.5 การกล้ำสัญญาณแบบไบนารีเอฟเอสเค.....	11
รูปที่ 3.6 บล็อกไดอะแกรมการกล้ำสัญญาณแบบไบนารีเอฟเอสเคด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์.....	12
รูปที่ 3.7 การดีมอดูเลตสัญญาณแบบไบนารีเอฟเอสเค.....	13
รูปที่ 3.8 โครงสร้างเครือข่ายของโมเดมสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า.....	14
รูปที่ 3.9 ลักษณะการรับส่งข้อมูล.....	14
รูปที่ 3.10 รูปแบบของชุดข้อมูล.....	15
รูปที่ 3.11 การทำงานของเครื่องมาสเตอร์.....	16
รูปที่ 3.12 การทำงานของเครื่องสเลฟ.....	16
รูปที่ 3.13 รูปแบบของชุดข้อมูลสำหรับการสื่อสารผ่านพอร์ต RS232.....	17
รูปที่ 4.1 โครงสร้างของโมเดมสื่อสารผ่านสายส่งไฟฟ้า.....	18
รูปที่ 4.2 การกำเนิดสัญญาณข้อมูลเลขฐานสองแบบอนุกรม.....	19
รูปที่ 4.3 การเขียนข้อมูลลงในรีจิสเตอร์ USART_DR.....	20
รูปที่ 4.4 โครงสร้างของการมอดูเลตสัญญาณด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์.....	21
รูปที่ 4.5 การกำหนดค่าความถี่ของโมดูล TIMER3.....	22
รูปที่ 4.6 วงจรจับสัญญาณคลื่นความถี่.....	23
รูปที่ 4.7 การทำงานของวงจรจับสัญญาณเมื่อ PWM1 และ PWM2 เป็น Low.....	24
รูปที่ 4.8 การทำงานของวงจรจับสัญญาณเมื่อ PWM1 และ PWM2 เป็น High.....	24
รูปที่ 4.9 การทำงานของวงจรจับสัญญาณเมื่อ PWM1 เป็น High และ PWM2 เป็น Low.....	25
รูปที่ 4.10 การทำงานของวงจรจับสัญญาณเมื่อ PWM1 เป็น Low และ PWM2 เป็น High.....	25
รูปที่ 4.11 โครงสร้างของชุดรับสัญญาณ.....	26
รูปที่ 4.12 วงจรตรวจจับเฟสของสัญญาณคลื่นความถี่ด้วย IC LM393.....	27
รูปที่ 4.13 บล็อกไดอะแกรมของ TIMER2 Capture Mode.....	27
รูปที่ 4.14 การทำงานของ TIMER2 Capture Mode.....	28
รูปที่ 4.15 การตรวจสอบลอจิกจากค่าความถี่ของสัญญาณอินพุต.....	29

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.16 การทดสอบการรับส่งสัญญาณคลื่นความถี่ผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า.....	29
รูปที่ 4.17 วงจรคู่ต่อสำหรับการทดสอบการส่งสัญญาณคลื่นความถี่.....	30
รูปที่ 4.18 อัตราการขยายสัญญาณที่ระยะต่างๆ เมื่อมีการเปลี่ยนค่าความถี่ของสัญญาณ.....	31
รูปที่ 4.19 วงจรเชื่อมต่อสำหรับรับสัญญาณ และส่งสัญญาณ.....	32
รูปที่ 4.20 วงจรกรองแถบความถี่สำหรับการส่งสัญญาณ.....	32
รูปที่ 4.21 วงจรกรองแถบความถี่สำหรับการรับสัญญาณ.....	33
รูปที่ 4.22 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรที่ออกแบบ.....	35
รูปที่ 5.1 ลำดับของสัญญาณข้อมูล.....	36
รูปที่ 5.2 การกำเนิดสัญญาณข้อมูลด้วยโปรแกรม Simulink.....	37
รูปที่ 5.3 สัญญาณข้อมูลที่ได้จากการจำลองผล.....	37
รูปที่ 5.4 การมอดูเลตสัญญาณด้วยโปรแกรม Simulink.....	38
รูปที่ 5.5 วงจรเชื่อมต่อสัญญาณสำหรับการส่งสัญญาณ.....	38
รูปที่ 5.6 การจำลองผลของวงจรเชื่อมต่อสำหรับการส่งสัญญาณด้วยโปรแกรม Simulink.....	39
รูปที่ 5.7 วงจรเชื่อมต่อสำหรับการรับสัญญาณ.....	39
รูปที่ 5.8 การจำลองผลของวงจรเชื่อมต่อสำหรับการรับสัญญาณด้วยโปรแกรม Simulink.....	40
รูปที่ 5.9 ชุดจำลองการส่งข้อมูลผ่านสายไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Simulink.....	40
รูปที่ 5.10 การดีมอดูเลตสัญญาณด้วยโปรแกรม Simulink.....	41
รูปที่ 5.11 สัญญาณข้อมูลที่ได้จากการดีมอดูเลตสัญญาณ.....	41
รูปที่ 5.12 การทดสอบระบบการรับส่งสัญญาณข้อมูลด้วยโปรแกรม Simulink.....	42

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารได้เจริญเติบโตและเข้ามามีบทบาทเกี่ยวข้องกับผู้คนทั่วโลกอย่างรวดเร็วประเทศไทยเองก็ให้ความสำคัญกับเทคโนโลยีการสื่อสารที่เจริญเติบโตอย่างรวดเร็วนี้ด้วยเช่นกัน ประชาชนในประเทศไทยได้ให้ความสำคัญและถือเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นต่อการดำรงชีวิต ในปัจจุบันการติดต่อสื่อสารมีหลายประเภท เช่น เทคโนโลยีการสื่อสารผ่านสายไฟ (power line communications – PLC) เป็นเทคโนโลยีการติดต่อสื่อสาร ที่สามารถทำให้การส่งสัญญาณ เสียง ข้อมูล และมัลติมีเดีย โดยผ่านระบบนำจ่ายกระแสไฟฟ้า หรือสายไฟฟ้าที่ใช้ตามบ้านเรือนทั่วไป ทั้งที่เป็นระบบจ่ายไฟฟ้าแรงต่ำ (low voltage distribution cable: 220 volts) หรือระบบจ่ายไฟฟ้าแรงปานกลาง (medium voltage distribution cable: 1000 -40,000 volts) ลักษณะที่ใช้งานประเภทการส่งข้อมูลแถบความถี่แคบ (narrowband PLC) เช่น การควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้าน การเฝ้าระวังรักษาความปลอดภัยในบ้าน intercom สื่อสารภายในบ้าน การอ่านมาตรวัดไฟฟ้าอัตโนมัติ (automatic meter reading – AMR) หรือการแจ้งอัตราค่ากระแสไฟฟ้า (tariff broadcast) ในปัจจุบันได้พัฒนาให้รับส่งข้อมูลแถบความถี่สูง (broadband PLC) เช่น high speed internet, video streaming, VoIP ผ่านระบบจ่ายไฟฟ้าแรงต่ำได้ด้วย จึงสามารถใช้เป็นโครงข่ายเข้าถึงผู้ใช้บริการ (access network) ทดแทนคู่สายโทรศัพท์ได้

การจัดการระบบสายจ่ายเพื่อประหยัดพลังงานของการไฟฟ้า โรงงานอุตสาหกรรม หรือของมหาวิทยาลัยที่ผู้วิจัยสังกัดอยู่ ได้ใช้ระบบจ่ายไฟฟ้าแรงต่ำและแรงดันปานกลาง ประกอบด้วยโหลดหลายกลุ่มกระจายตัวตามสถานที่ต่าง ๆ ห่างกันเป็นระยะทางเกินกว่า 1 กิโลเมตร การเฝ้าตรวจการใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยพื้นฐานที่จะนำมาใช้เพื่อประกอบแผนการอนุรักษ์พลังงาน การเชื่อมต่อข้อมูลทางไกลทำได้หลายวิธี เช่น การส่งสัญญาณแบบใช้สายสื่อสาร อาจจะเป็นสายโทรศัพท์ แบบไร้สาย หรือรูปแบบอื่น ๆ สิ่งต่าง ๆ เหล่านี้ ต้องวางระบบตัวกลางเพื่อนำส่งข้อมูลการวัด งานวิจัยนี้จะนำเทคโนโลยีการสื่อสารผ่านสายไฟฟ้ามาใช้ประโยชน์ โดยจะประยุกต์กับข้อมูลการวัดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้ากับโหลดกลุ่มต่าง ๆ ผ่านการจำลองด้วยและประเมินผลด้วยซอฟต์แวร์ที่เหมาะสม เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลสำคัญในการประหยัดพลังงานของระบบต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาการวัดและส่งข้อมูลทางไกลด้วยการสื่อสารผ่านสายไฟฟ้า
- 1.2.2 พัฒนารูปแบบของวงจรต่อเชื่อม (coupling circuit) ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด
- 1.2.3 ศึกษาผลกระทบจากการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยและกรองกำลังไฟฟ้าต่อการส่งข้อมูลทางไกลรูปแบบนี้

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 ศึกษาเกี่ยวกับระบบสายจ่ายแรงต่ำและแรงดันปานกลางของการไฟฟ้า โรงงานอุตสาหกรรม และของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.3.2 ระบบไฟฟ้าเป็นแบบ 3 เฟส สมดุล

1.3.3 ไม่พิจารณาผลของการอ้อมในแกนเหล็กของหม้อแปลง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้แบบจำลองการวัดและส่งข้อมูลทางไกลด้วยการสื่อสารผ่านสายไฟฟ้า

1.4.2 ได้เผยแพร่ความรู้จากงานวิจัยในที่ประชุมทางวิชาการหรือในวารสารวิชาการ

1.4.3 ได้มอบบัณฑิตทางด้านวิศวกรรมระบบไฟฟ้ากำลัง 1 คน เพื่อพัฒนาประเทศ

1.4.4 ได้องค์ความรู้ที่การไฟฟ้า โรงงานอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยหรือส่วนราชการที่มีระบบสายจ่ายไฟฟ้านำไปใช้งานเพื่อการประหยัดพลังงาน



บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

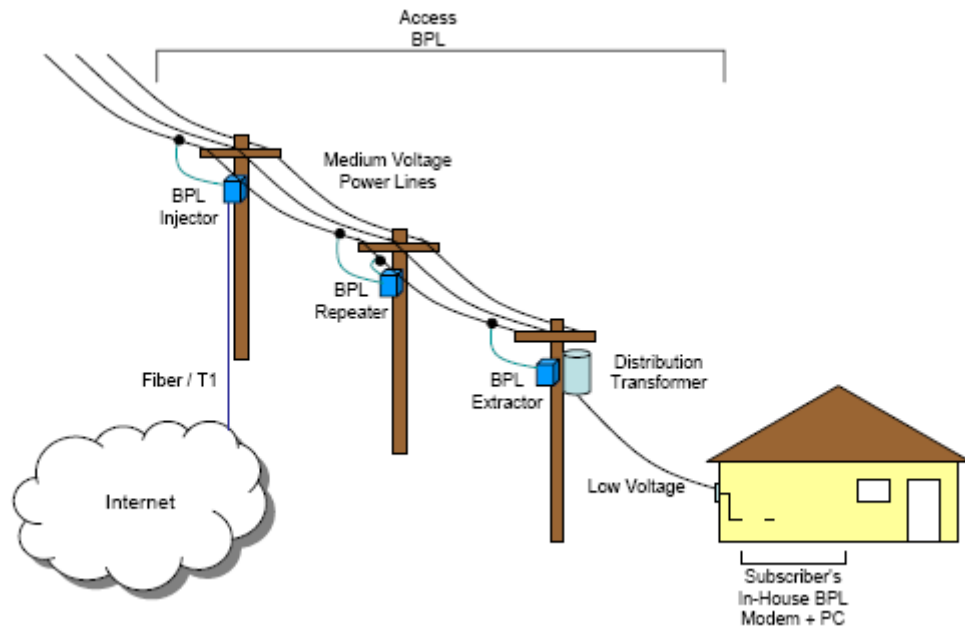
เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง การทบทวนวรรณกรรม ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ได้แก่ โครงสร้างและหลักการทำงานของการสื่อสารผ่านสายไฟฟ้า ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ทั้งหมด

2.2 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวคิดของโครงการวิจัย

การสื่อสารผ่านสายไฟฟ้าเป็นการส่งสัญญาณข้อมูลในช่วงความถี่ต่าง ๆ ไปบนสัญญาณไฟฟ้าซึ่งมีความถี่ 50 เฮิรตซ์ (Hz) ในระยะแรก เทคโนโลยีการสื่อสารผ่านสายไฟฟ้า ถูกประยุกต์ใช้กับการสื่อสารข้อมูลที่มีความเร็วไม่มาก ระดับกิโลบิตต่อวินาที (kbps) ของช่วงความถี่ต่ำ (low frequency: LF) ระดับ 30 - 300 กิโลเฮิรตซ์ (kHz) โดยส่วนใหญ่จะใช้ในการควบคุมและเพิ่มประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้า เช่น การควบคุมอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า การอ่านหน่วยมาตรวัดแบบอัตโนมัติ การตรวจสอบภาวะไฟฟ้าขัดข้อง หรือการควบคุมโหลดไฟฟ้า ฯลฯ รวมทั้งได้มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสื่อสารผ่านสายไฟฟ้า เพื่อควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ภายในบ้าน เช่น ควบคุมระบบแสงสว่าง ระบบรักษาความปลอดภัย ระบบสัญญาณแจ้งเตือนอัคคีภัย และระบบปรับอากาศ เป็นต้น ต่อมาเมื่อความต้องการใช้งานระบบสื่อสารความเร็วสูงเพิ่มมากขึ้น จึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารผ่านสายไฟฟ้า ให้สามารถรองรับการสื่อสารข้อมูลความเร็วสูง (broadband power line: BPL) ในระดับเมกะบิตต่อวินาที (Mbps) ในช่วงความถี่สูง (high frequency: HF) ระดับ 1 - 40 เมกะเฮิรตซ์ (MHz) เช่น การสื่อสารข้อมูลแบบมัลติมีเดียหรือสื่อประสม (multimedia) การใช้งานอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง จึงเป็นที่รู้จักในชื่อเทคโนโลยีการสื่อสาร broadband ความเร็วสูงผ่านสายไฟฟ้าง่ายแสดงในรูปแบบที่ 1

โครงสร้างของโครงข่ายระบบไฟฟ้าอันประกอบด้วยสายส่งไฟฟ้าซึ่งมีแรงดันสามระดับ ได้แก่ แรงดันสูง (100-400 กิโลโวลต์) แรงดันปานกลาง (10-30 กิโลโวลต์) และแรงดันต่ำ (220-440 โวลต์) เชื่อมต่อกันผ่านหม้อแปลงซึ่งทำหน้าที่ปรับลดระดับแรงดัน โดยหม้อแปลงทำหน้าที่เหมือนตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน (low-pass filter) ซึ่งจะยอมให้สัญญาณที่มีความถี่ประมาณไม่เกิน 20 กิโลเฮิรตซ์ ผ่านได้เท่านั้น ทำให้สัญญาณข้อมูลการสื่อสาร broadband ความเร็วสูงผ่านสายไฟฟ้าในช่วงความถี่สูง ไม่สามารถผ่านหม้อแปลงได้โดยตรง นอกจากนั้น สายส่งไฟฟ้ายังถูกออกแบบมาให้มีความเหมาะสมสำหรับการส่งสัญญาณในช่วงความถี่ต่ำ และจะเกิดการลดทอนสัญญาณเพิ่มขึ้นเมื่อส่งสัญญาณที่มีความถี่สูงขึ้น จะพบว่าคุณลักษณะของระบบไฟฟ้าจึงมี

ความสัมพันธ์กับการใช้งานเทคโนโลยีการสื่อสาร broadband ความเร็วสูงผ่านสายไฟฟ้าเป็นอย่างมาก



รูปที่ 2.1 การติดตั้งระบบ BPL กับระบบจำหน่ายไฟฟ้า

สัญญาณการสื่อสาร broadband ความเร็วสูงผ่านสายไฟฟ้า จะถูกส่งผ่านสายส่งไฟฟ้าไปยังปลายทางได้อย่างถูกต้องก็ต่อเมื่อสัญญาณทุกค่าความถี่ใช้งานเกิดการลดทอนเท่ากันและเกิดการประวิง (delay) เท่ากัน หรือกล่าวได้ว่าความเร็วเฟสของสัญญาณ (phase velocity) และค่าคงที่การลดทอนของสัญญาณ (attenuation constant) จะต้องมีค่าคงที่ตลอดทั้งย่านความถี่ใช้งานของสัญญาณ สายส่งไฟฟ้าแรงดันสูงมีความยาวตั้งแต่หลายสิบถึงหลายร้อยกิโลเมตร แบ่งออกเป็นสายส่งสองลักษณะ คือ สายพาดอากาศ (overhead lines) และสายใต้ดิน (underground cables) สายส่งไฟฟ้าแรงดันปานกลาง/แรงดันต่ำประกอบด้วยสายส่งข้ามศีรษะในปริมาณใกล้เคียงกับสายส่งใต้ดิน สายส่งไฟฟ้าแรงดันปานกลางมีความยาวประมาณ 5 - 25 กิโลเมตร และสายส่งไฟฟ้าแรงดันต่ำมีความยาวประมาณ 100 - 500 เมตร นอกจากนี้ อิมพีแดนซ์ของสายส่งไฟฟ้าก็มีผลกระทบต่อ การส่งสัญญาณสื่อสาร broadband ความเร็วสูงผ่านสายไฟฟ้า โดยถ้าช่องสัญญาณไม่เข้ากับอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดสัญญาณและอิมพีแดนซ์ของโหลดของสัญญาณจะก่อให้เกิดการสะท้อนกลับของสัญญาณที่จุดเชื่อมต่อ และมีสัญญาณเพียงบางส่วนที่ผ่านไปถึงภาครับ ทำให้สัญญาณที่ได้รับมีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio: SNR) ลดต่ำลงและมีอัตราผิดพลาด (bit error rate: BER) เพิ่มสูงขึ้น โดยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนซึ่งแสดงอัตราส่วนระหว่างกำลังสัญญาณที่สะท้อนกลับต่อกำลังสัญญาณที่มาถึงจุดเชื่อมต่อ มีความสัมพันธ์กับอิมพีแดนซ์ของสายส่ง

ไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกัน ดังนั้นในการส่งสัญญาณจำเป็นต้องคำนึงถึงค่าอิมพีแดนซ์ของสายไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกันเพื่อให้สัญญาณที่ภาครับมีความประสิทธิภาพเพียงพอต่อการใช้งาน โดยทั่วไปโครงข่ายระบบไฟฟ้าจะประกอบด้วยสายเคเบิลชนิดต่าง ๆ มาเชื่อมต่อกันเป็นจำนวนมาก เนื่องจากมีการต่อขยายและพัฒนาระบบไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตลอดเวลา จึงทำให้การเข้าคู่กันของค่าอิมพีแดนซ์ (impedance matching) เพื่อใช้งานการสื่อสารบรอดแบนด์ความเร็วสูงผ่านสายไฟฟ้า จะต้องคำนึงถึงอิมพีแดนซ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงของสายส่งไฟฟ้าแต่ละส่วนที่เชื่อมต่อกัน นอกจากนี้ อิมพีแดนซ์ของสายส่งไฟฟ้ายังมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลา (time-variant) เนื่องจากการเพิ่มหรือลดจำนวนโหลดไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่กับสายส่งไฟฟ้า จึงอาจส่งผลให้เกิดการไม่เข้าคู่กันของอิมพีแดนซ์ในการใช้งานการสื่อสารบรอดแบนด์ความเร็วสูงผ่านสายไฟฟ้า

โดยทั่วไปจะมีรูปแบบการเชื่อมต่อโครงข่ายระบบไฟฟ้าได้ดังนี้

1. รูปแบบการเชื่อมต่อแบบบัส (bus topology)

การเชื่อมต่อแบบบัสประกอบด้วยสายส่งไฟฟ้าแรงดันปานกลางหนึ่งเส้นและสายส่งไฟฟ้าแรงดันต่ำจำนวนหนึ่งที่เชื่อมต่อกับสายส่งไฟฟ้าแรงดันปานกลางเพื่อส่งสัญญาณสื่อสารบรอดแบนด์ความเร็วสูงผ่านสายไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ การเชื่อมต่อแบบนี้ใช้เงินลงทุนในการก่อสร้างระบบไม่สูงมาก แต่มีความน่าเชื่อถือต่ำ เนื่องจากเมื่อสายส่งไฟฟ้าแรงดันปานกลางเกิดความผิดพลาดขึ้น ผู้ใช้จำนวนมากที่อยู่ใต้นิวของสายที่เกิดความผิดพลาดนั้นจะไม่สามารถใช้งานการสื่อสารผ่านสายไฟฟ้าได้

2. รูปแบบการเชื่อมต่อแบบสตาร์ (star topology)

การเชื่อมต่อแบบสตาร์เป็นรูปแบบที่ใช้การเข้าถึงกับโครงข่ายแกนหลัก (backbone network) แบบแยกออกจากกัน ดังนั้น เมื่อเกิดความผิดพลาดขึ้นที่สายส่งไฟฟ้าแรงดันปานกลาง จำนวนผู้ใช้ที่ไม่สามารถใช้งานการสื่อสารผ่านสายไฟฟ้าจะถูกจำกัดอยู่เพียงภายในพื้นที่ของโครงข่ายเข้าถึงที่เกิดความผิดพลาดขึ้นเท่านั้น

3. รูปแบบการเชื่อมต่อแบบวงแหวน (ring topology)

การเชื่อมต่อแบบวงแหวนเป็นรูปแบบการเชื่อมต่อที่มีความน่าเชื่อถือสูงที่สุดเนื่องจากเมื่อสายส่งไฟฟ้าแรงดันปานกลางในวงแหวนเกิดความผิดพลาดขึ้น สัญญาณสื่อสารผ่านสายไฟฟ้า จะถูกส่งต่อไปยังผู้ใช้ผ่านอีกเส้นทางหนึ่งของวงแหวนโดยอัตโนมัติภายในเวลาอันสั้น (ในระดับวินาที)

งานวิจัยนี้จะนำรูปแบบการเชื่อมต่อผ่านสายไฟฟ้ามาใช้งานกับการวัดและส่งข้อมูลทางไกลเพื่อใช้กับระบบเฝ้าตรวจการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าเพื่อการประหยัดพลังงาน

2.3 การทบทวนวรรณกรรมและสารสนเทศที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนวรรณกรรม / สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง สามารถสรุปทฤษฎี หลักการ และวิธีการดำเนินงานวิจัยต่าง ๆ ที่ใช้ออกแบบจำลองการส่งสัญญาณผ่านสายไฟโดยย่อได้ดังนี้

- อนุศาสน์ วรรณโท, สุพจน์ เสมออด [1] การใช้งานโปรแกรม ATP-EMTP (Alternative Transient Program-Electro Magnetic Transient Program) ในการวิเคราะห์สภาวะทรานเซียนต์ในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งสภาวะทรานเซียนต์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังมีอยู่มากมาย ในที่นี้ได้นำเอากรณีศึกษาสภาวะทรานเซียนต์บางส่วนมานำเสนอ ดังนี้ การสับเซอร์กิตเบรกเกอร์เพื่อป้องกันพลังงานให้กับ Shunt Reactor, แรงดันเกินเนื่องจากการสับเซอร์กิตเบรกเกอร์, แรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่า, แรงดันเหนี่ยวนำระหว่างสาย (Coupling between power lines), แรงดันฟื้นตัวในระบบไฟฟ้ากำลัง (Transients Recovery Voltage : TRV in power system), การเกิดเฟอร์โรรีโซแนนซ์ในหม้อแปลงแรงดัน (Ferroresonance in Voltage Transformer), ฮาร์โมนิกส์ (Harmonics), ผลของระยะความยาวสายส่งต่อการติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (Distance Effect installation of surge arresters), การเขียน ATP MODELS, การควบคุมแรงดันไฟฟ้าโดยใช้ Static Var Compensator : SVC
- เจนจบ วีระพานิชเจริญ [3] กล่าวถึงการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ภายในบ้าน ต่อมาเนื่องจากความต้องการใช้บริการอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงเพิ่มขึ้น และจากการที่สายไฟฟ้าเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่มีการติดตั้งใช้งานอย่างครอบคลุมพื้นที่ส่วนใหญ่อยู่แล้ว จึงเกิดการพัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารความเร็วสูงผ่านสายไฟฟ้าหรือบีพีแอล (BPL) เพื่อให้บริการอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง ส่วนประกอบทางกายภาพของเทคโนโลยีการสื่อสารความเร็วสูงผ่านสายไฟฟ้า ประกอบด้วยสายส่งไฟฟ้าแรงดันสูง แรงดันปานกลาง และแรงดันต่ำ เชื่อมต่อกันผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งรูปแบบการเชื่อมต่อโครงข่ายระบบไฟฟ้าแบบต่าง ๆ (การเชื่อมต่อแบบบัส แบบดาว แบบวงแหวน) มีผลต่อการออกแบบโครงข่ายเข้าถึงเพื่อการให้บริการการสื่อสารความเร็วสูงผ่านสายไฟฟ้า ทั้งในเรื่องของงบลงทุน ความน่าเชื่อถือ และประสิทธิภาพของโครงข่าย ส่วนสถาปัตยกรรมโครงข่ายสำหรับการให้บริการการสื่อสารความเร็วสูงผ่านสายไฟฟ้านั้นมีหลายรูปแบบ
- Tran-Anh , Auriol and Tran-Quoc [5] ได้กล่าวถึง การส่งสัญญาณผ่านสายไฟในช่วงความถี่สูง 1- 30 MHz และได้อธิบายการกระจายเครือข่ายสัญญาณประกอบด้วย สายเคเบิลแบบพาดอากาศ (overhead cables) สายเคเบิลใต้ดิน (underground cables) และหม้อแปลงแรงดันปานกลางและแรงดันต่ำ โดยใช้โปรแกรม ATP/EMTP
- X. Wang, A.D. Yerrabelli, R.P. Quest, C.P. Kinne [8] พัฒนาการส่งสัญญาณผ่านสายไฟ โดยการพัฒนาในด้านต่าง ๆ ประกอบด้วย line traps, line tuning units, CCVTs, transmitters, receivers, balanced และ skewed hybrids

- F. Pacheco, M. Lobashov, M. Pinho, G. Pratl [10] นำเสนอการสื่อสารผ่านสายไฟฟ้าเพื่อควบคุมและวัดการใช้พลังงานสำหรับผู้ใช้ไฟรายย่อย โดยนำมาใช้เป็นช่องทางสื่อสารข้อมูลเพื่อเป็นส่วนหนึ่งของระบบ SCADA
- J.V. Wijayakulasooriya, D.M.I.S. Dasanayake, P.I. Muthukumarana, H.M.P.P. Kumara, L.A.D.S.D. Thelisinghe [11] นำเสนอผลการศึกษาระบบการวัดพลังงานในระบบไฟฟ้าเฟสเดียวโดยใช้การสื่อสารผ่านสายไฟฟ้า มีการกำหนดหมายเลข ID ของเครื่องมือวัด ภายใต้การควบคุมของไมโครคอนโทรลเลอร์ และได้เพิ่มเติมการตรวจวัดกระแสแรงดันไฟฟ้า รวมทั้งตัวประกอบกำลังด้วย

2.4 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้เพื่อมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการสื่อสารข้อมูลผ่านสายไฟฟ้า ดังจะได้กล่าวถึงในบทที่ 3 ต่อไป



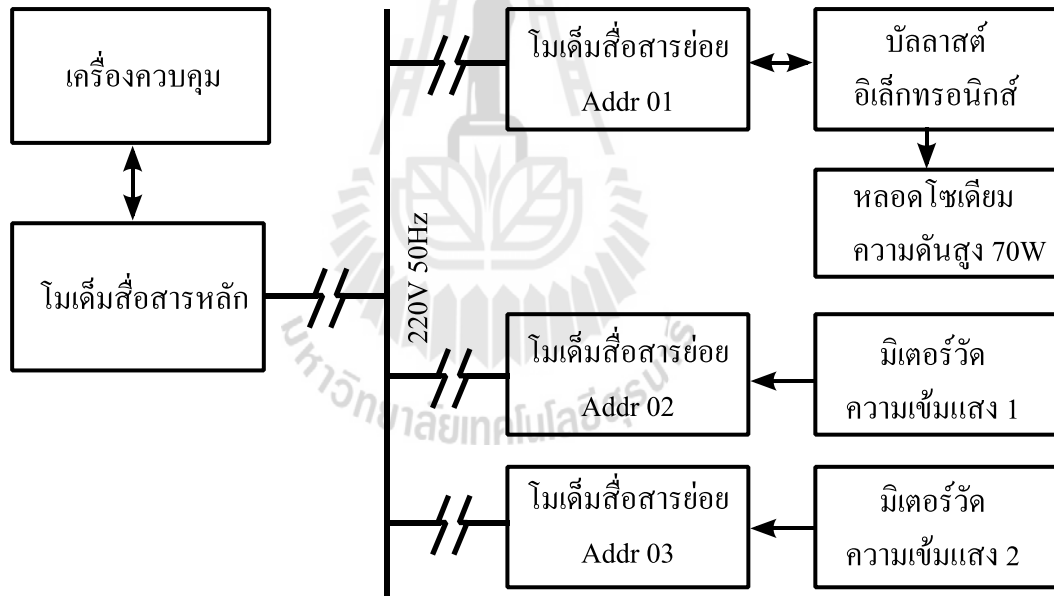
บทที่ 3

การสื่อสารข้อมูลผ่านสายส่งไฟฟ้า

3.1 กล่าวนำ

ในการรับส่งสัญญาณข้อมูลผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่จัดการการรับส่งของข้อมูลแต่ละชุด รวมทั้งการแปลงรูปแบบของสัญญาณเพื่อให้สามารถรับส่งข้อมูลที่ต้องการได้ โดยทำการแปลงสัญญาณของข้อมูลให้อยู่ในรูปของสัญญาณคลื่นความถี่ เพื่อให้สามารถส่งสัญญาณผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้าได้ บนช่วงของความถี่ที่กำหนด ซึ่งเรียกว่าโมเดมสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า โดยทำหน้าที่เชื่อมต่อสัญญาณข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ส่วนต่าง ๆ ในระบบ

3.2 โครงสร้างการสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบการควบคุมอัตโนมัติ

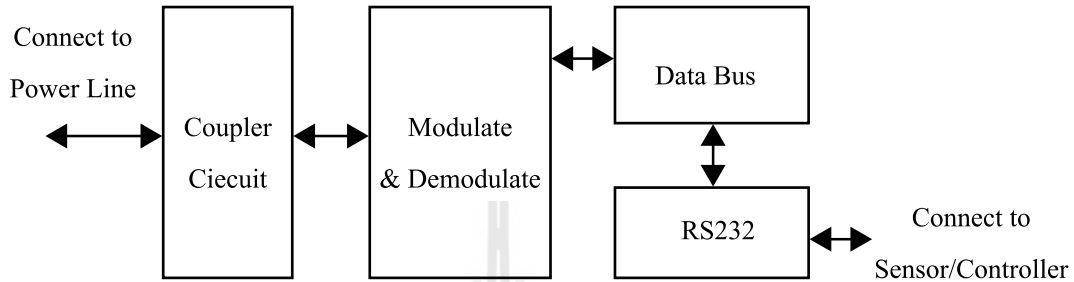


รูปที่ 3.1 โครงสร้างระบบการควบคุมแสงสว่างอัตโนมัติผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า

ในระบบการสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้าประกอบด้วยอุปกรณ์ 2 ส่วนหลัก คือ โมเดมสื่อสารหลัก (master modem) ซึ่งเชื่อมต่ออยู่กับเครื่องควบคุม ทำหน้าที่ควบคุมการรับส่งของข้อมูลในระบบ และส่วนของโมเดมสื่อสารย่อย (slave modem) โดยจะเชื่อมต่ออยู่กับอุปกรณ์ตรวจวัด เช่น มิเตอร์วัด

แสง และบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งมีการกำหนดหมายเลขประจำเครื่องของโมเด็มสื่อสารย่อยแต่ละตัวไว้แตกต่างกัน เพื่อให้โมเด็มสื่อสารหลักสามารถติดต่อกับ โมเด็มย่อยได้อย่างถูกต้อง

3.3 โมเด็มสื่อสารผ่านสายส่งไฟฟ้า



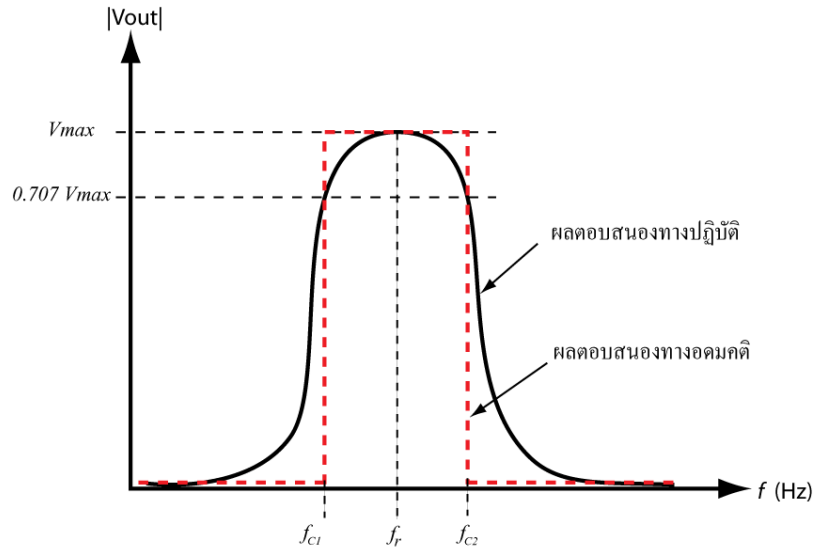
รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมโครงสร้างของโมเด็มสื่อสารผ่านสายส่งไฟฟ้า

จากโครงสร้างการทำงานของโมเด็มสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.2 แสดงโครงสร้างการทำงานของโมเด็ม ซึ่งประกอบด้วยภาคการสื่อสารกับอุปกรณ์ภายนอก ได้แก่ อุปกรณ์เซนเซอร์ บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ หรือเครื่องคอมพิวเตอร์ ผ่านช่องทางการสื่อสารแบบอนุกรม (RS232) ภาคการกล่าสัญญาณข้อมูล (modulate) ให้อยู่ในรูปสัญญาณคลื่นความถี่สูง ซึ่งจะถูกส่งไปยังวงจรจับสัญญาณ และวงจรเชื่อมต่อ (coupler circuit) ที่ทำหน้าที่ผสมสัญญาณของข้อมูลเข้าไปยังสัญญาณกำลังไฟฟ้า ในสายส่งกำลังไฟฟ้า

ในส่วนของการรับสัญญาณ วงจรเชื่อมต่อจะทำหน้าที่แยกสัญญาณของข้อมูลออกจากสัญญาณกำลังไฟฟ้า และภาคถอดการกล่าสัญญาณ (demodulate) ทำหน้าที่แปลงสัญญาณคลื่นความถี่ให้เป็นสัญญาณข้อมูลแบบดิจิทัล สำหรับใช้ในการแสดงผล และประมวลผล

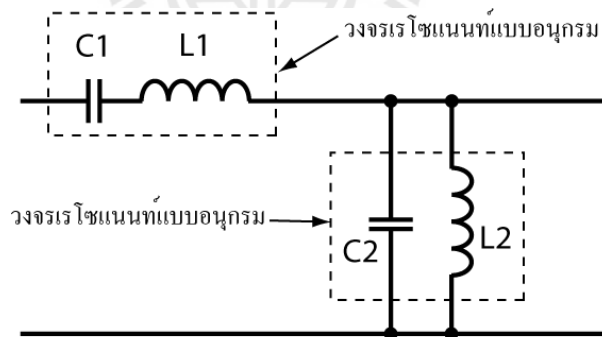
3.4 วงจรเชื่อมต่อ

วงจรคู่ต่อเป็นส่วนเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างตัวกำเนิดสัญญาณคลื่นความถี่กับสายส่งกำลังไฟฟ้า ซึ่งทำหน้าที่ผสมสัญญาณของข้อมูลที่อยู่ในรูปของสัญญาณคลื่นความถี่ เข้าไปกับสัญญาณกำลังไฟฟ้า และแยกสัญญาณของข้อมูลออกจากสัญญาณกำลังไฟฟ้า และป้องกันไม่ให้สัญญาณกำลังไฟฟ้าที่ความถี่ 50Hz และสัญญาณรบกวนอื่นๆ ผ่านเข้ามา โดยใช้วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (band-pass filter) เพื่อกำหนดช่วงความถี่ของสัญญาณที่ผ่านเข้าออก



รูปที่ 3.3 ผลตอบสนองของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน

จากผลการตอบสนองความถี่ ดังรูปที่ 3.3 เมื่อให้ $|V_{out}|$ คือขนาดของแรงดันทางด้านเอาต์พุต วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน จะยอมให้ความถี่ตั้งแต่ f_{c1} ถึงความถี่ f_{c2} ผ่านไปยังขั้วเอาต์พุตของวงจร ส่วนความถี่ตั้งแต่ 0Hz ถึงความถี่ f_{c1} กับความถี่ที่สูงกว่า f_{c2} จะไม่ผ่านไปยังขั้วเอาต์พุตของวงจร โดยใช้หลักการของวงจรเรโซแนนซ์ แบบอนุกรม และแบบขนาน



รูปที่ 3.4 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมและแบบขนาน

ดังรูปที่ 3.4 วงจรแบบอนุกรมจะมีความต้านทานต่ำที่ความถี่เรโซแนนซ์ (resonant frequency: f_c) ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านไปได้มาก แต่สำหรับความถี่อื่นจะมีความต้านทานสูง ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านไปได้น้อย ส่วนวงจรแบบขนานจะมีความต้านทานต่ำที่ความถี่อื่น ๆ ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลลงกราวด์ ส่วนสัญญาณที่ความถี่เรโซแนนซ์จะผ่านไปได้

3.5 การเข้ารหัสแบบเอฟเอสเค

สัญญาณเอฟเอสเค เป็นการกรอ้าสัญญาณเชิงความถี่แบบดิจิทัล ที่มีความถี่เปลี่ยนแปลงตามขนาดของสัญญาณข้อมูล โดยเลือกใช้การกรอ้าสัญญาณชนิด 2 ความถี่ หรือการกรอ้าสัญญาณแบบไบนารีเอฟเอสเค (binary frequency shift keying: BFSK) ซึ่งประกอบด้วยสัญญาณ 2 ความถี่ คือ สัญญาณมาร์ก และสัญญาณสเปซ ตามสมการดังต่อไปนี้

$$S_1(t) = A\cos(\omega_c - \omega_d)t \quad \text{สำหรับสัญญาณมาร์ก} \quad (3.1)$$

$$S_2(t) = A\cos(\omega_c + \omega_d)t \quad \text{สำหรับสัญญาณสเปซ} \quad (3.2)$$

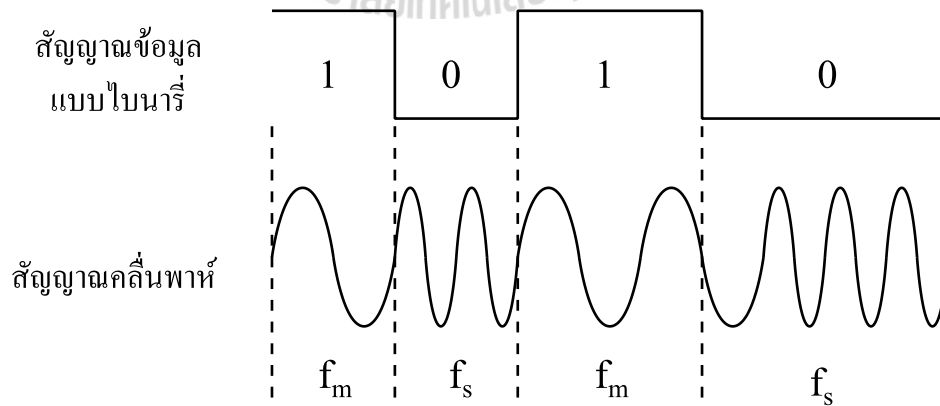
เมื่อ ω_c คือค่าความถี่สัญญาณพาหะ

ω_d คือค่าความถี่เบี่ยงเบน

จะเห็นได้ว่าสัญญาณมาร์กมีความถี่ $\omega_m = \omega_c - \omega_d$ และสัญญาณสเปซมีความถี่เป็น $\omega_s = \omega_c + \omega_d$

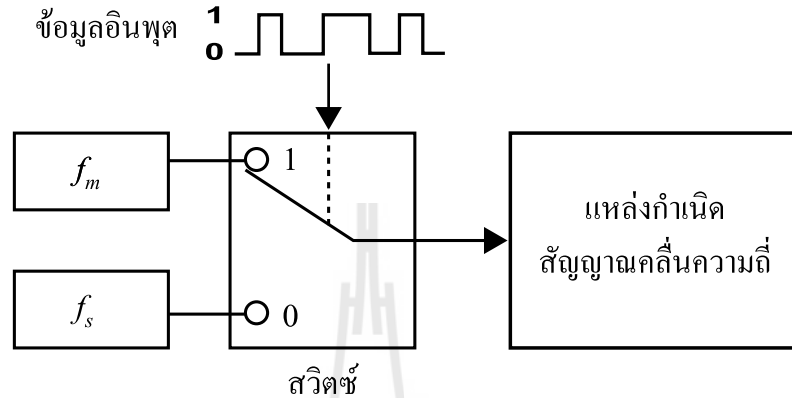
3.6 การส่งสัญญาณเอฟเอสเค

ในส่วนของการส่งสัญญาณจะอาศัยการกรอ้าสัญญาณแบบไบนารีเอฟเอสเค ซึ่งเป็นการมอดูเลตสัญญาณแบบดิจิทัล ความถี่ของสัญญาณคลื่นพาห้จะเกิดการเบี่ยงเบน ตามสัญญาณข้อมูลอินพุตแบบไบนารี (binary input data)



รูปที่ 3.5 การกรอ้าสัญญาณแบบไบนารีเอฟเอสเค

จากรูปที่ 3.5 แสดงการกล้ำสัญญาณแบบไบนารีเอฟเอสเค ซึ่งสัญญาณที่ได้จะประกอบด้วย 2 ความถี่ คือ ความถี่มาร์ค และความถี่สเปซ โดยที่ลอจิก 1 ถูกแทนด้วยความถี่มาร์ค (f_m) และลอจิก 0 จะถูกแทนด้วยความถี่สเปซ (f_s)

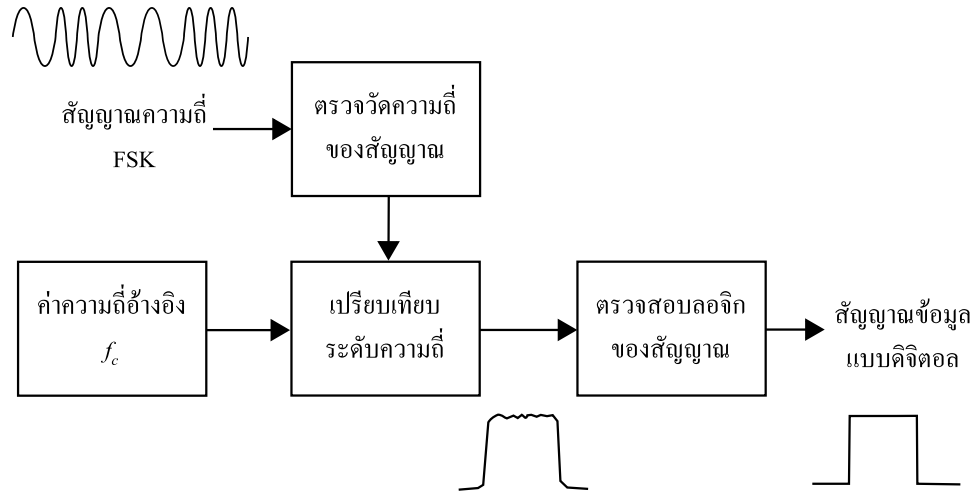


รูปที่ 3.6 บล็อกไดอะแกรมการกล้ำสัญญาณแบบไบนารีเอฟเอสเคด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

จากการกล้ำสัญญาณแบบไบนารีเอฟเอสเคดังรูปที่ 3.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการตรวจสอบลอจิกของสัญญาณข้อมูลแบบไบนารี ซึ่งกำหนดอัตราการเปลี่ยนแปลง (baud rate) 4800 บิตต่อวินาที (bps) โดยกำเนิดสัญญาณความถี่ f_m เมื่อลอจิกของข้อมูลเป็น 1 และกำเนิดสัญญาณความถี่ f_s เมื่อลอจิกของข้อมูลเป็น 0 ซึ่งกำหนดให้ $f_m=122.8\text{kHz}$ และ $f_s=132.8\text{kHz}$

3.7 การรับสัญญาณเอฟเอสเค

ในส่วนของการรับสัญญาณ เป็นการคืนมอดูเลตสัญญาณ หรือการแปลงสัญญาณคลื่นความถี่ที่มีการมอดูเลตแบบเอฟเอสเค กลับไปเป็นสัญญาณข้อมูลดิจิทัล สัญญาณที่ได้จากการคืนมอดูเลตจะมีระดับเปลี่ยนแปลงตามค่าความถี่



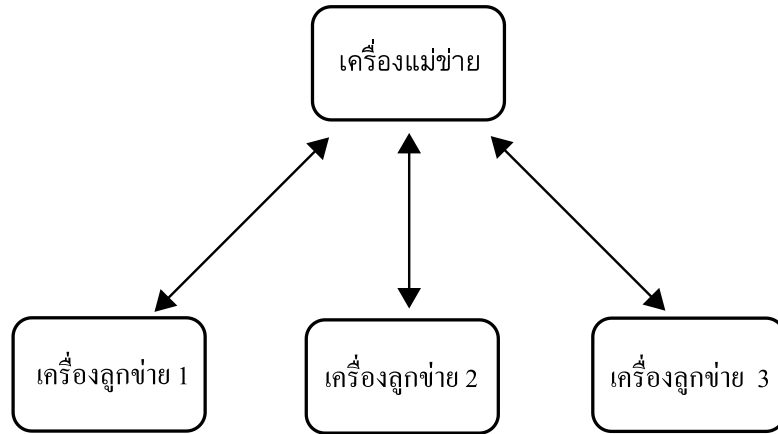
รูปที่ 3.7 การคิโมดูเลตสัญญาณแบบไบนารีเอฟเอสเค

จากรูปที่ 3.7 แสดงการทำงานของ การคิโมดูเลตสัญญาณจากสัญญาณที่มีการมอดูเลตทางความถี่ให้เป็นสัญญาณของข้อมูลแบบดิจิทัล โดยการตรวจวัดค่าความถี่ของสัญญาณขาเข้าในแต่ละลูกคลื่น แล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่าความถี่อ้างอิง หรือค่าความถี่พาห้ (f_c) จะได้สัญญาณที่เกิดจากค่าผลต่างของระดับความถี่ของสัญญาณ จากนั้นนำมาเข้าภาคตรวจสอบระดับลอจิกของสัญญาณ ทำหน้าที่แปลงสัญญาณระดับผลต่างของความถี่ให้เป็นสัญญาณข้อมูลแบบดิจิทัล

3.8 โพรโทคอลสำหรับการสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า

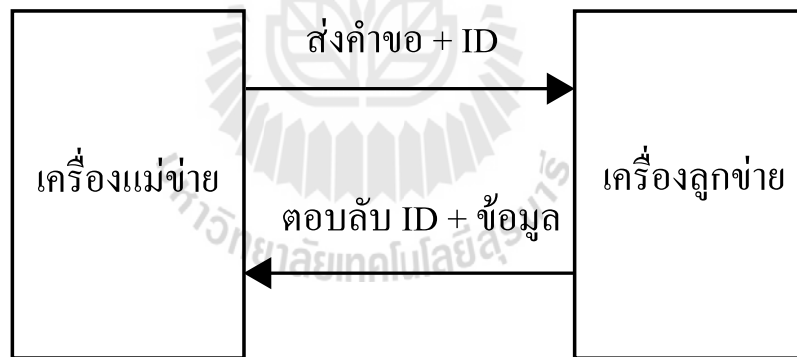
3.8.1 โครงสร้างของโปรโตคอลสำหรับการสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า

โปรโตคอลสำหรับการสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า จะใช้โปรโตคอลแบบ Modbus serial line protocol ซึ่งเป็นโปรโตคอลที่ใช้สำหรับการสื่อสารแบบ มาสเตอร์-สเลฟ (Master-Slaves protocol) โดยจะมีเครื่องมาสเตอร์ 1 ตัว ในระบบสายสัญญาณ และที่เหลือเป็นเครื่องสเลฟ ซึ่งมีการกำหนดหมายเลขประจำเครื่อง (slave address) ที่ไม่ซ้ำกัน



รูปที่ 3.8 โครงสร้างเครือข่ายของโมเด็มสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า

ในโครงสร้างของระบบการสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า ประกอบด้วย โมเด็มเครื่องมาตรฐาน และ โมเด็มเครื่องสเลฟว์ ดังรูปที่ 3.8 โดยโมเด็มเครื่องมาตรฐานจะทำหน้าที่เป็นเครื่องศูนย์กลางของการรับส่งข้อมูล ซึ่งมีการกำหนดลำดับ และช่วงเวลาของการรับส่งข้อมูลกับเครื่องลูกข่ายแต่ละเครื่องที่แน่นอน เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการซ้อนทับของสัญญาณข้อมูล



รูปที่ 3.9 ลักษณะการรับส่งข้อมูล

การติดต่อสื่อสารของระบบ จะเริ่มจากเครื่องมาตรฐานส่งคำขอไปยังเครื่องสเลฟว์ที่ต้องการติดต่อ ซึ่งในชุดข้อมูล (data packet) จะระบุชนิดของข้อมูลและหมายเลขประจำเครื่องของเครื่องลูกข่ายที่ต้องการติดต่อ เมื่อเครื่องลูกข่ายแต่ละเครื่องได้รับคำขอ จะทำการตรวจสอบชนิดของข้อมูล และหมายเลขประจำเครื่องที่ได้รับ ถ้าตรงกับหมายเลขเครื่องที่ระบุไว้ เครื่องลูกข่ายดังกล่าวจะทำการตอบกลับข้อมูลการวัดตามชนิดของข้อมูลที่ระบุไว้ในข้อมูลคำขอ กลับไปยังเครื่องแม่ข่าย ดังรูปที่ 3.9

3.8.2 รูปแบบของชุดข้อมูล (frame description)

ในชุดของข้อมูล ดังรูปที่ 3.10 จะประกอบด้วย 4 ส่วน คือ

1. หมายเลขประจำเครื่องสเลฟ (slave address) 1 ไบต์ ซึ่งกำหนดให้อยู่ในช่วง 1 - 15
2. รหัสฟังก์ชัน (function code) 1 ไบต์ คือส่วนของคำสั่ง ที่เครื่องมาสเตอร์ส่งไปยังเครื่องสเลฟ เช่น
 - 0x00 คือ คำสั่งให้เครื่องที่เป็นสเลฟ ตอบกลับข้อมูลการวัด
 - 0x01 คือ คำสั่งให้เครื่องที่เป็นสเลฟอ่านค่าของข้อมูลที่เครื่องมาสเตอร์ส่งไป
3. ข้อมูลที่ต้องการรับส่ง มีขนาดตั้งแต่ 0 ถึง 252 ไบต์
4. ส่วนตรวจสอบความผิดพลาดของการรับส่งข้อมูล (error checking)

Slave Address	Function Code	Data	CRC
1 byte	1 byte	0 up to 252 byte(s)	2 bytes CRC Low CRC Hi

รูปที่ 3.10 รูปแบบของชุดข้อมูล

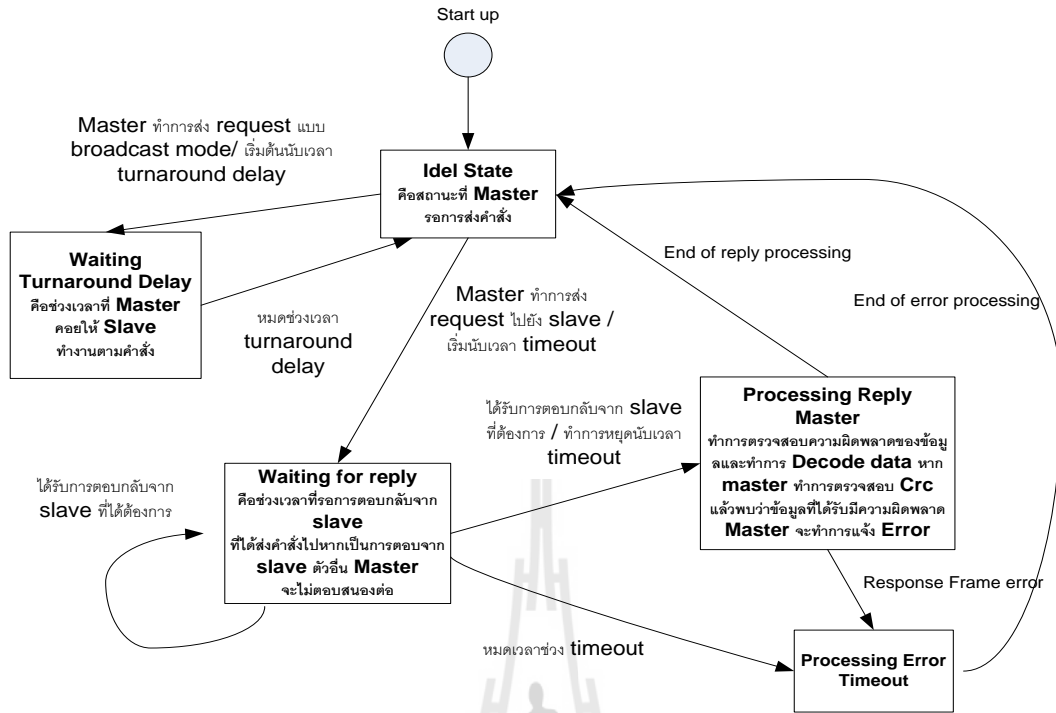
3.8.3 การตรวจสอบความผิดพลาดของข้อมูลที่รับได้

ในส่วนท้ายของชุดข้อมูล จะเป็นส่วนที่ใช้สำหรับตรวจสอบความผิดพลาดของข้อมูลที่รับได้ โดยใช้การตรวจสอบด้วยส่วนซ้ำซ้อนแบบวน (cyclic redundancy check, CRC) เป็นวิธีการตรวจสอบความผิดพลาดของชุดข้อมูลที่ทำการรับส่ง ระหว่างตัวส่งสัญญาณกับตัวรับสัญญาณ โดยฝ่ายส่งจะทำการคำนวณค่า CRC ขนาด 16 บิต (CRC-16) ของชุดข้อมูล ซึ่งมีการกำหนดอัลกอริทึมที่อยู่ในรูปพหุนาม $x^{16} + x^{14} + x + 1$ และเติมไว้ในตอนท้ายของชุดข้อมูลที่ต้องการส่ง

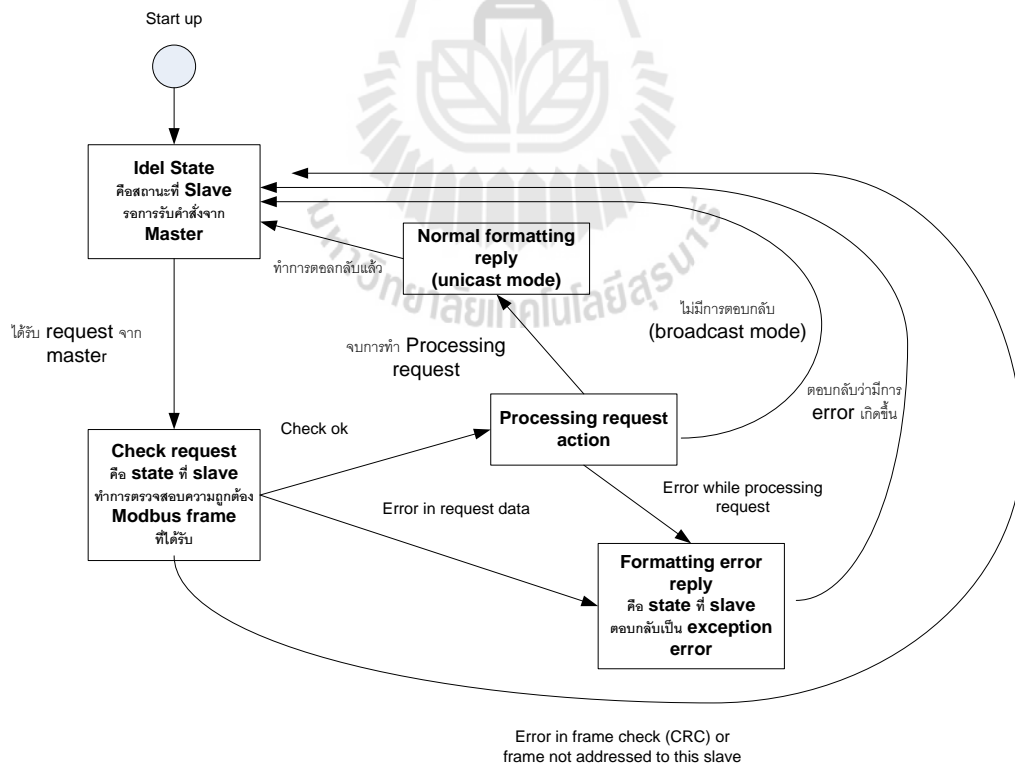
ในส่วนของตัวรับสัญญาณข้อมูล จะใช้อัลกอริทึมเดียวกันในการคำนวณหาค่า CRC ของชุดข้อมูลที่รับแล้วเปรียบเทียบกับค่า CRC ที่ได้รับจากตัวส่งสัญญาณเท่ากันหรือไม่ ถ้าค่า CRC ของทั้งสองเท่ากัน ให้ถือว่าชุดข้อมูลดังกล่าวเป็นข้อมูลที่ถูกต้อง ถ้าไม่เท่ากัน แสดงว่าชุดข้อมูลที่รับดังกล่าวมีความผิดพลาดของข้อมูล ให้ตัวส่งสัญญาณทำการส่งข้อมูลซ้ำ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้อง

3.8.4 การทำงานของเครื่องมาสเตอร์ และเครื่องสเลฟ

การทำงานของ Master และ Slave สามารถอธิบายได้ดังแผนภาพในรูปที่ 3.11 และ 3.12



รูปที่ 3.11 การทำงานของเครื่องมาสเตอร์



รูปที่ 3.12 การทำงานของเครื่องสเลฟ

3.9 การรับส่งข้อมูลกับอุปกรณ์ภายนอก

โมเด็มแต่ละเครื่อง ทั้งที่เป็นเครื่องมาสเตอร์ และเครื่องสเลฟว์ สามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ เครื่องมือวัด และอุปกรณ์อื่นๆ ผ่านช่องทางการสื่อสารแบบอนุกรม (serial communication port) โดยใช้มาตรฐานการเชื่อมต่อแบบอนุกรม EIA RS-232 แบบอะซิงโครนัส 2 ทิศทาง หรือเรียกว่า RS232 ซึ่งเป็นการส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ 2 ตัว ที่มีความเร็วของการส่งข้อมูลเท่ากัน โดยกำหนดอัตราการส่งข้อมูลเป็น 9600 บิตต่อวินาที

3.9.1 โพรโทคอลสำหรับการสื่อสารกับอุปกรณ์ภายนอก

โพรโทคอลสำหรับการสื่อสารกับอุปกรณ์ภายนอก จะคล้ายกับ โพรโทคอลการสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า โดยตัดส่วนของหมายเลขประจำเครื่อง ที่อยู่ในช่วงข้อมูลออก เนื่องจากเป็นการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ 2 ตัว จึงไม่จำเป็นต้องระบุหมายเลขประจำเครื่อง ซึ่งมีรูปแบบของชุดข้อมูลดังรูปที่ 3.13

1. รหัสฟังก์ชัน (function code) 1 ไบต์ คือส่วนของคำสั่ง ที่เครื่องมาสเตอร์ส่งไปยังเครื่องสเลฟว์ เช่น

- 0x00 คือ คำสั่งให้เครื่องที่เป็นสเลฟว์ ตอบกลับข้อมูลการวัด

- 0x01 คือ คำสั่งให้เครื่องที่เป็นสเลฟว์อ่านค่าของข้อมูลที่เครื่องมาสเตอร์ส่งไป

2. ข้อมูลที่ต้องการรับส่ง มีขนาดตั้งแต่ 0 ถึง 253 ไบต์

3. ส่วนตรวจสอบความผิดพลาดของการรับส่งข้อมูล (error checking)

Function Code	Data	CRC
1 byte	0 up to 252 byte(s)	2 bytes CRC Low CRC Hi

รูปที่ 3.13 รูปแบบของชุดข้อมูลสำหรับการสื่อสารผ่านพอร์ต RS232

3.10 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอระบบการสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า มาประยุกต์ใช้กับระบบควบคุมที่จำเป็นต้องมีการรับส่งข้อมูลกันระหว่างอุปกรณ์แต่ละส่วน ประกอบด้วยมิเตอร์วัดค่าต่าง ๆ ซึ่งมีตำแหน่งของการติดตั้งที่ห่างกัน โดยการส่งสัญญาณข้อมูลไปในสายส่งกำลังไฟฟ้า ผ่านโมเด็มสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า เพื่อช่วยลดการใช้สายส่งสัญญาณข้อมูลระหว่างอุปกรณ์แต่ละส่วน

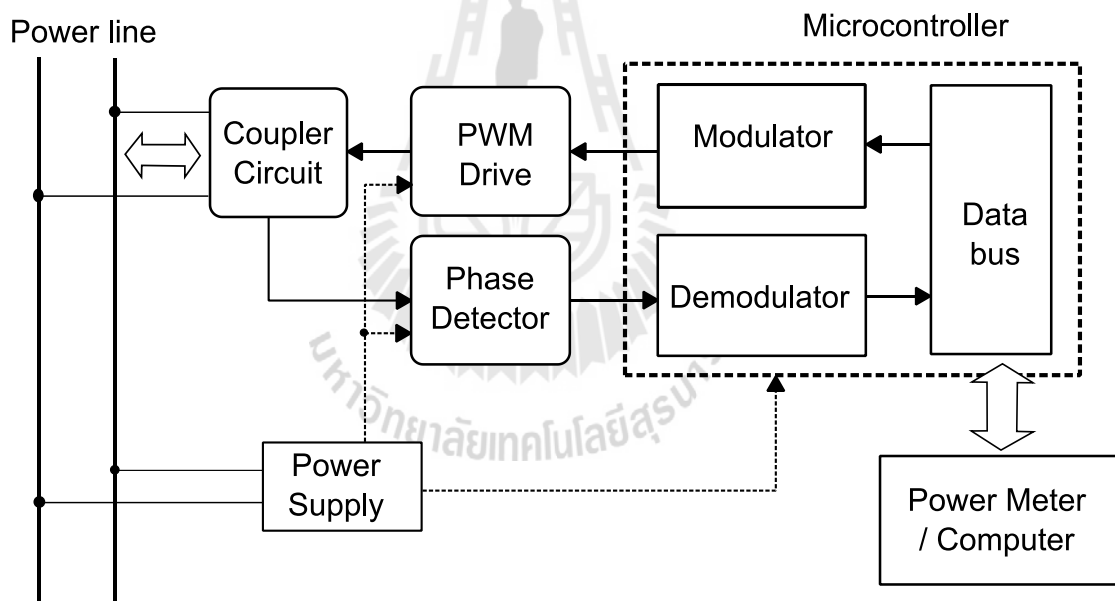
บทที่ 4

การออกแบบโมเด็มสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า

4.1 คำนำ

การส่งข้อมูลผ่านสายไฟฟ้าต้องการวงจรเชื่อมต่อเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวกลางในส่งข้อมูล การสื่อสารโดยใช้สายไฟฟ้านี้อาศัยหลักการส่งสัญญาณความถี่สูงไปในสายไฟฟ้า โดยกำลังไฟฟ้าที่ส่งใช้ความถี่ 50 Hz ความถี่ปกติของการสื่อสารจะสูงกว่านี้ อยู่ในย่าน kHz ดังนั้นอุปกรณ์เชื่อมต่อหรืออาจจะเรียกว่า โมเด็มพีแอลซี (PLC modem) จึงเป็นอุปกรณ์ประเภทวงจรกรองความถี่สูงผ่าน (high-pass filter) วงจรเหล่านี้มีโครงสร้างเป็นวงจร LC ที่ทำการปรับตั้งความถี่ ไซเรนซ์ตามที่กำหนด

4.2 หลักการของโมเด็มสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 4.1 โครงสร้างของโมเด็มสื่อสารผ่านสายส่งไฟฟ้า

โมเด็มสื่อสารผ่านสายไฟฟ้าอาจจะเขียนในรูปแผนผังการทำงานอย่างง่ายได้ดังรูปที่ 4.1 ประกอบด้วยอุปกรณ์ส่วนต่าง ๆ ดังนี้

- ชุดส่งสัญญาณข้อมูล

ในส่วนของชุดส่งสัญญาณข้อมูล ทำหน้าที่นำสัญญาณข้อมูลที่อยู่ในรูปของสัญญาณดิจิทัล มาทำการมอดูเลตให้เป็นสัญญาณข้อมูลที่อยู่ในรูปสัญญาณคลื่นความถี่

และมีวงจรขับสัญญาณ ทำหน้าที่ขยายระดับสัญญาณของสัญญาณคลื่นความถี่ ก่อนส่งไปยังวงจรคู่ต่อ

- ชุดรับสัญญาณข้อมูล

ทำหน้าที่นำสัญญาณข้อมูลที่อยู่ในรูปคลื่นความถี่ ซึ่งได้รับมาจากวงจรคู่ต่อ มาทำการแปลงให้อยู่ในรูปของระดับผลต่างของสัญญาณข้อมูล

- วงจรเชื่อมต่อ

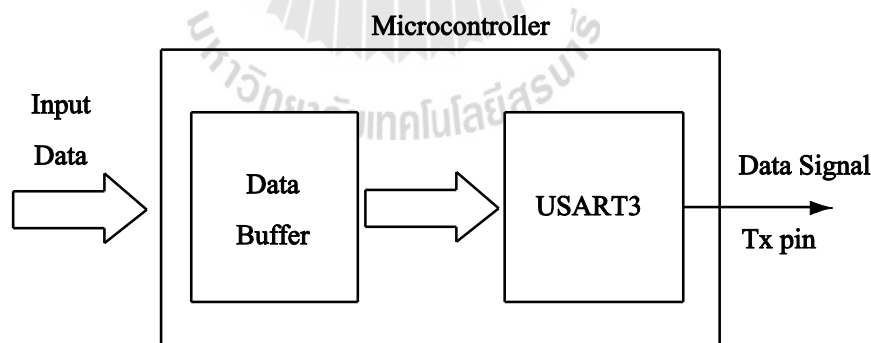
วงจรเชื่อมต่อเป็นส่วนที่เชื่อมต่อกับสายส่งกำลังไฟฟ้า ซึ่งทำหน้าที่ผสมสัญญาณของข้อมูลที่อยู่ในรูปของสัญญาณคลื่นความถี่ เข้าไปกับสัญญาณกำลังไฟฟ้า และแยกสัญญาณของข้อมูลออกจากสัญญาณกำลังไฟฟ้า

- ส่วนเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก

เป็นส่วนที่ทำหน้าที่รับข้อมูล และส่งข้อมูลกับอุปกรณ์ภายนอก ได้แก่ อุปกรณ์เซนเซอร์ที่ต้องการวัด และเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยใช้ช่องทางการสื่อสารแบบอนุกรม

4.3 การออกแบบชุดส่งสัญญาณข้อมูล

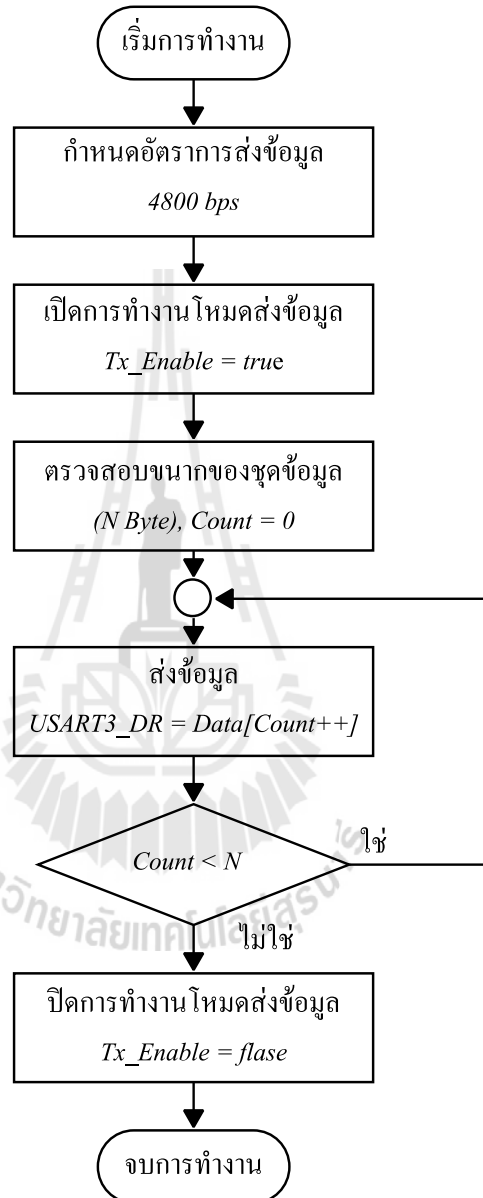
4.3.1 การกำเนิดสัญญาณข้อมูลเลขฐานสองแบบอนุกรม



รูปที่ 4.2 การกำเนิดสัญญาณข้อมูลเลขฐานสองแบบอนุกรม

จากการกำเนิดสัญญาณข้อมูลแบบอนุกรม ดังรูปที่ 4.2 แสดงการแปลงข้อมูลเลขฐานสองที่อยู่ในหน่วยความจำของไมโครคอนโทรลเลอร์ ให้เป็นสัญญาณข้อมูลแบบดิจิทัล โดยใช้โมดูลการสื่อสารแบบอนุกรม (universal synchronous asynchronous receiver transmitter: USART) ในโหมดการส่งข้อมูล (transmitted mode) ที่มีอยู่ในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งเลือกใช้โมดูล USART3 สำหรับการส่งข้อมูลของชุดส่งสัญญาณ

การทำงานของโมดูล USART3 สำหรับการส่งข้อมูล เริ่มจากการกำหนดอัตราการส่งข้อมูล (baud rate) กำหนดเป็น 4800 บิตต่อวินาที (bps) ซึ่งจะถูกระบุค่าครั้งเดียวหลังจากไมโครคอนโทรลเลอร์เริ่มทำงาน และเปิดการทำงานของโหมดส่งข้อมูล จากนั้นทำการเขียนข้อมูลที่ต้องการส่งลงในรีจิสเตอร์ USART_DR ซึ่งเป็นรีจิสเตอร์สำหรับรับการส่งข้อมูล และรับข้อมูลของโมดูล USART3 ซึ่งมีการทำงานดังนี้



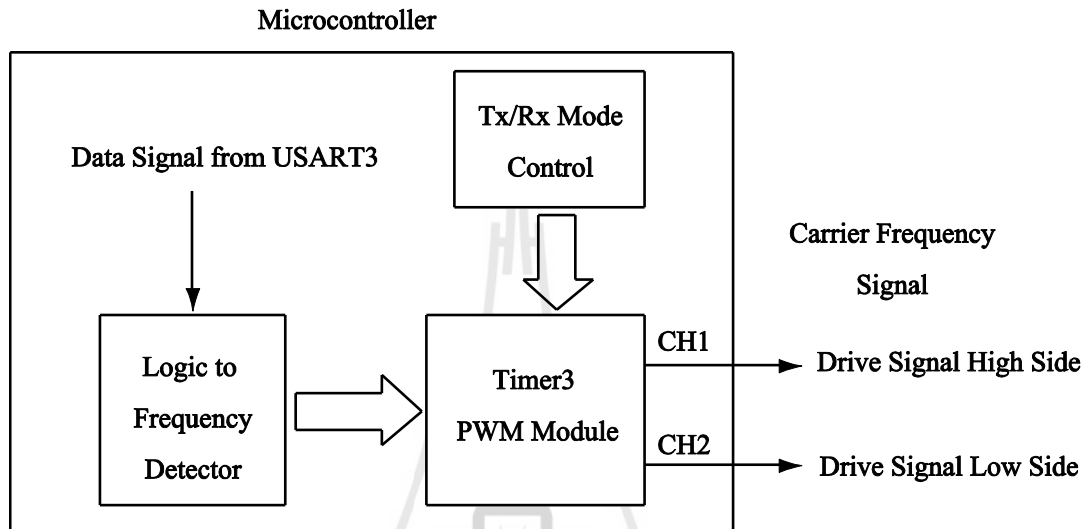
รูปที่ 4.3 การเขียนข้อมูลลงในรีจิสเตอร์ USART_DR

การเขียนข้อมูลลงในรีจิสเตอร์ USART_DR เริ่มจากการตรวจสอบขนาดจำนวนไบต์ของข้อมูล จากนั้นทำการวนรอบเขียนข้อมูลครั้งละ 1 ไบต์ จนครบจำนวนของข้อมูลที่ต้องการส่ง สัญญาณของข้อมูลจะถูกส่งออกทางขาเอาต์พุตของโมดูล USART3 (USART3_Tx pin,

PORTB.10) หลังจากส่งข้อมูลครบตามจำนวนของข้อมูล ทำการปิดการทำงาน โหมดส่งข้อมูล ซึ่งจะถูกเปลี่ยนเป็น โหมดสำหรับการรับข้อมูลต่อไป ดังรูปที่ 4.3

4.3.2 การมอดูเลตสัญญาณด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์

ในส่วนของการมอดูเลตสัญญาณ ประกอบด้วยส่วนตรวจจับสัญญาณข้อมูล ที่ได้จากสัญญาณเอาต์พุตของ โมดูล USART3 และส่วนกำเนิดสัญญาณความถี่ โดยใช้โมดูลเวลา TIMER3 PWM mode ของไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 4.4 โครงสร้างของการมอดูเลตสัญญาณด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์

โครงสร้างของการมอดูเลตสัญญาณ ดังรูปที่ 4.4 แสดงการมอดูเลตสัญญาณข้อมูลให้อยู่ในรูปสัญญาณคลื่นความถี่ โดยเริ่มจากการรับสัญญาณของข้อมูลที่ได้จากโมดูล USART3 ซึ่งเป็นสัญญาณข้อมูลดิจิทัลแบบอนุกรม ทำการวนรอบอ่านค่าสถานะ หรือค่าลอจิกของสัญญาณข้อมูลด้วยความถี่ 500 kHz เพื่อกำหนดค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุต ซึ่งสัญญาณที่ได้จะประกอบด้วย 2 ความถี่ คือ ความถี่มาร์ค และความถี่สเปซ โดยที่ลอจิก 1 ถูกแทนด้วยความถี่มาร์ค (f_m) และลอจิก 0 จะถูกแทนด้วยความถี่สเปซ (f_s) ซึ่งกำหนดให้ $f_m = 122.8$ kHz และ $f_s = 132.8$ kHz

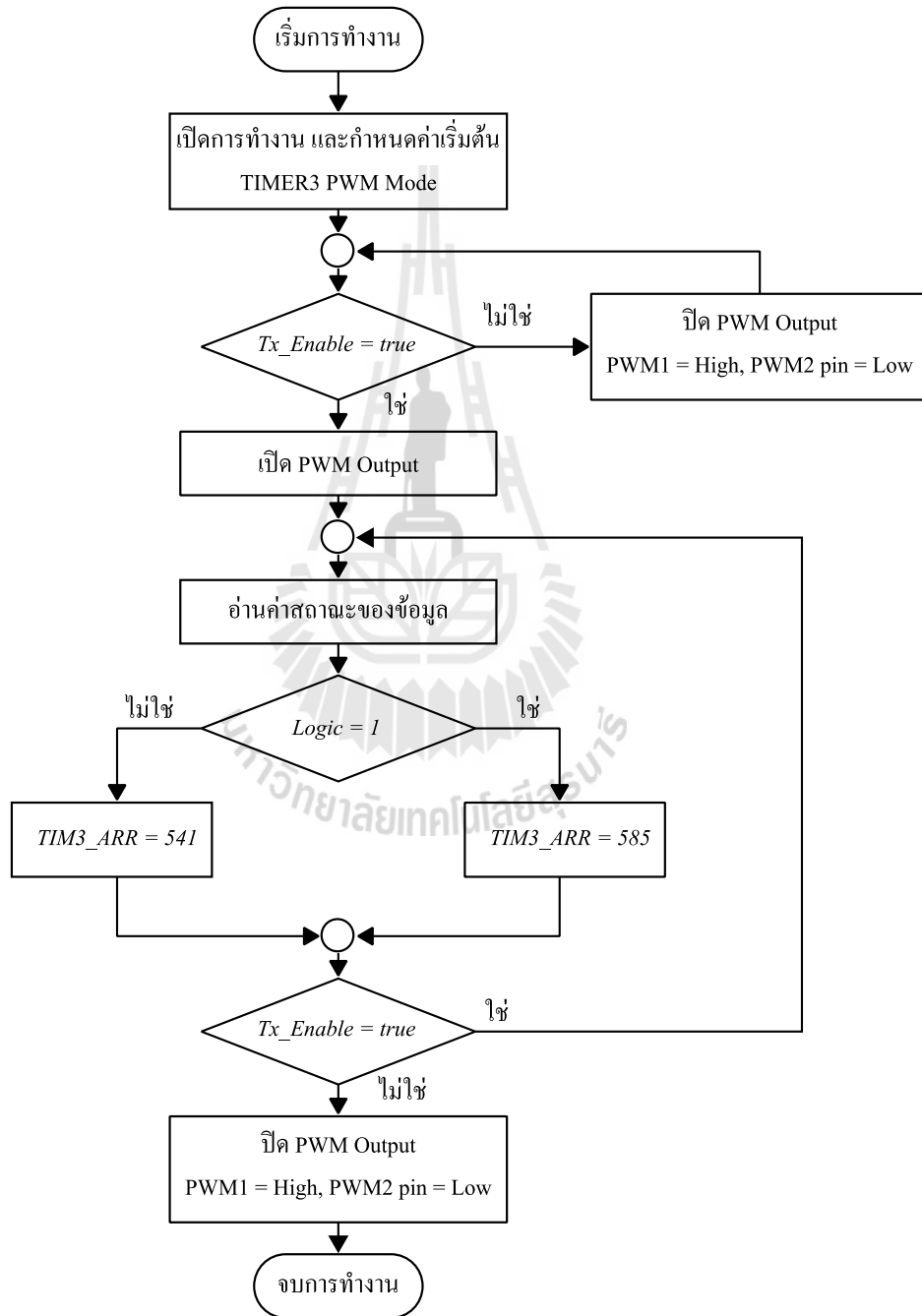
พิจารณาจากแผนภาพในรูปที่ 4.5 จากค่าของความถี่ที่ได้จะถูกส่งไปยังโมดูลกำเนิดสัญญาณความถี่พัลส์ ซึ่งสามารถควบคุมความถี่ของสัญญาณพัลส์ได้จากการกำหนดค่าคาบเวลาของโมดูล TIMER3 ในรีจิสเตอร์ TIM3_ARR (TIM2 auto-reload register) ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{TIM3_ARR} = \frac{F_{CK}}{\text{Output Frequency}} - 1 \quad (4.1)$$

เมื่อกำหนดให้ F_{CK} คือ ความถี่สัญญาณนาฬิกา ในที่นี้กำหนดให้ใช้ 72 MHz ดังนั้นสามารถกำหนดค่าในรีจิสเตอร์ TIM3_ARR สำหรับความถี่ f_m และ f_s ได้ดังนี้

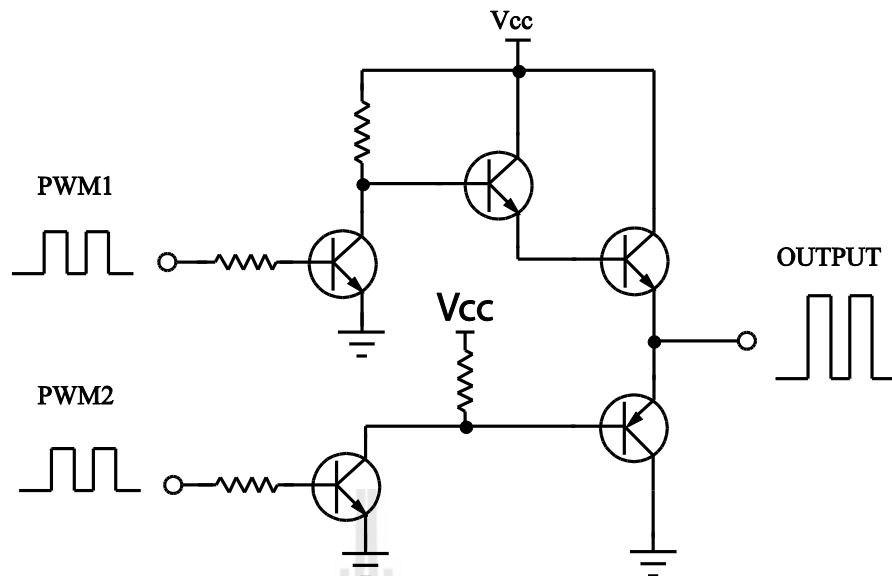
$$TIM3_ARR(f_m) = \frac{72MHz}{122.8kHz} - 1 = 585.32 \cong 585$$

$$TIM3_ARR(f_s) = \frac{72MHz}{132.8kHz} - 1 = 541.17 \cong 541$$



รูปที่ 4.5 การกำหนดค่าความถี่ของโมดูล TIMER3

4.3.3 วงจรขับสัญญาณคลื่นความถี่



รูปที่ 4.6 วงจรขับสัญญาณคลื่นความถี่

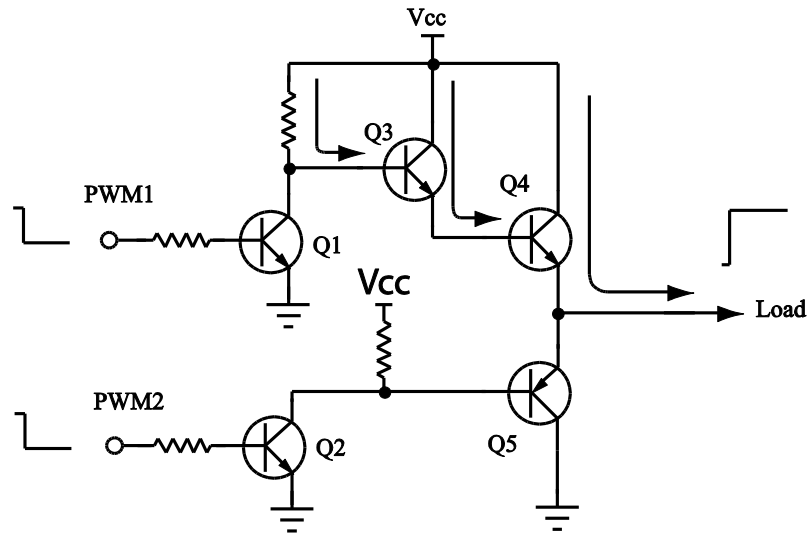
จากวงจรขับสัญญาณคลื่นความถี่ดังรูปที่ 4.6 แสดงการขยายสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากการมอดูเลต ทำหน้าที่ขยายขนาดแรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าด้านเอาต์พุต เพื่อให้สามารถส่งผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า ไปยังตัวรับสัญญาณ โดยขนาดของแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณด้านเอาต์พุต จะขึ้นอยู่กับขนาดของแหล่งจ่ายไฟ V_{cc} ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8Vdc และการกำหนดสถานะของสัญญาณด้านเอาต์พุต สามารถกำหนดได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การกำหนดสถานะสัญญาณเอาต์พุตของวงจรขับสัญญาณ

State	Input		Output
	PWM1	PWM2	
1	Low	Low	High
2	High	High	Low
3	High	Low	Open Circuit (Floating)
4	Low	High	Short Circuit

สถานะที่ 1:

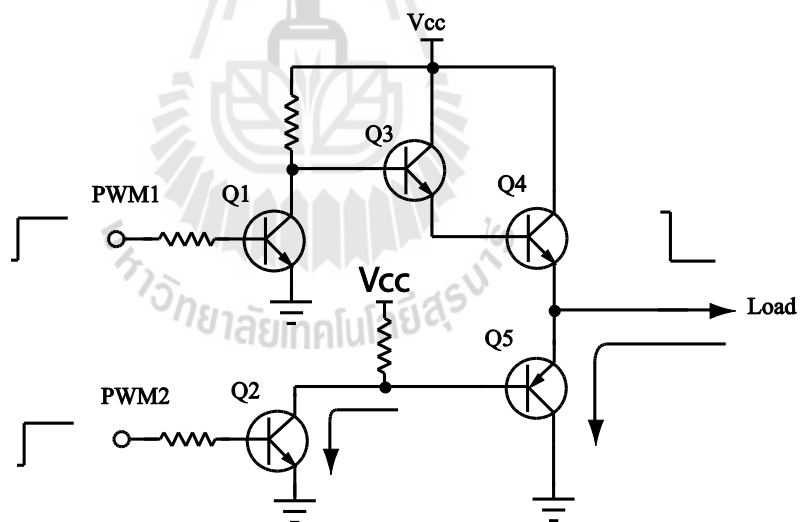
เมื่อกำหนดให้สัญญาณ PWM1 และ PWM2 มีสถานะเป็น Low ดังรูปที่ 4.7 ทำให้ทรานซิสเตอร์ Q3 และ Q4 เกิดการนำกระแส ซึ่งทำให้สัญญาณด้านเอาต์พุตมีสถานะเป็น High



รูปที่ 4.7 การทำงานของวงจรขับสัญญาณเมื่อ PWM1 และ PWM2 เป็น Low

สถานะที่ 2:

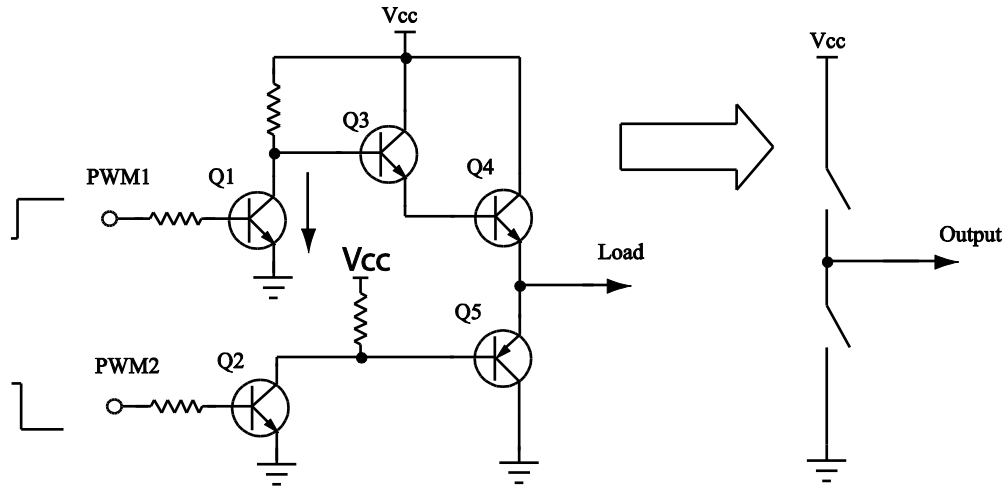
เมื่อกำหนดให้สัญญาณ PWM1 และ PWM2 มีสถานะเป็น High ดังรูปที่ 4.8 ทำให้ทรานซิสเตอร์ Q2 และ Q5 เกิดการนำกระแส ซึ่งทำให้สัญญาณด้านเอาต์พุตมีสถานะเป็น Low



รูปที่ 4.8 การทำงานของวงจรขับสัญญาณเมื่อ PWM1 และ PWM2 เป็น High

สถานะที่ 3:

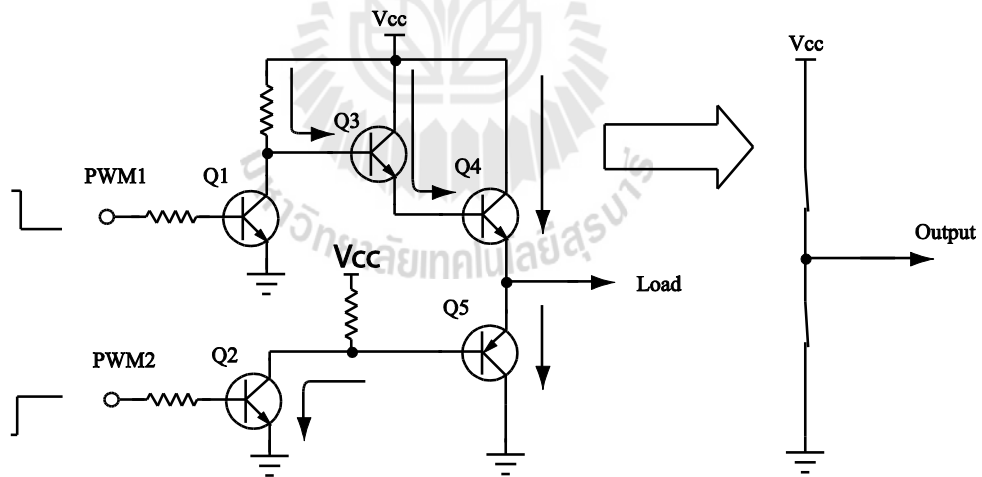
เมื่อกำหนดให้สัญญาณ PWM1 และ PWM2 มีสถานะเป็น High และ Low ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.9 ทำให้ทรานซิสเตอร์ Q4 และ Q5 หยุดนำกระแส ทำให้วงจรด้านเอาต์พุตเปิด ซึ่งจะใช้ในกรณีที่ไม่มีกระแสสัญญาณ และกรณีที่โมเดมดังกล่าวอยู่ในโหมดรับสัญญาณ



รูปที่ 4.9 การทำงานของวงจรขับสัญญาณเมื่อ PWM1 เป็น High และ PWM2 เป็น Low

สถานะที่ 4:

เมื่อกำหนดให้สัญญาณ PWM1 และ PWM2 มีสถานะเป็น Low และ High ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.10 ทำให้ทรานซิสเตอร์ Q4 และ Q5 นำกระแสพร้อมกัน ทำให้วงจรด้านเอาต์พุตเกิดการลัดวงจร ซึ่งในการกำหนดสัญญาณของ PWM1 และ PWM2 จะต้องไม่ทำให้เกิดสถานะดังกล่าวเนื่องจากอาจทำให้เกิดความเสียหายแก่วงจรได้



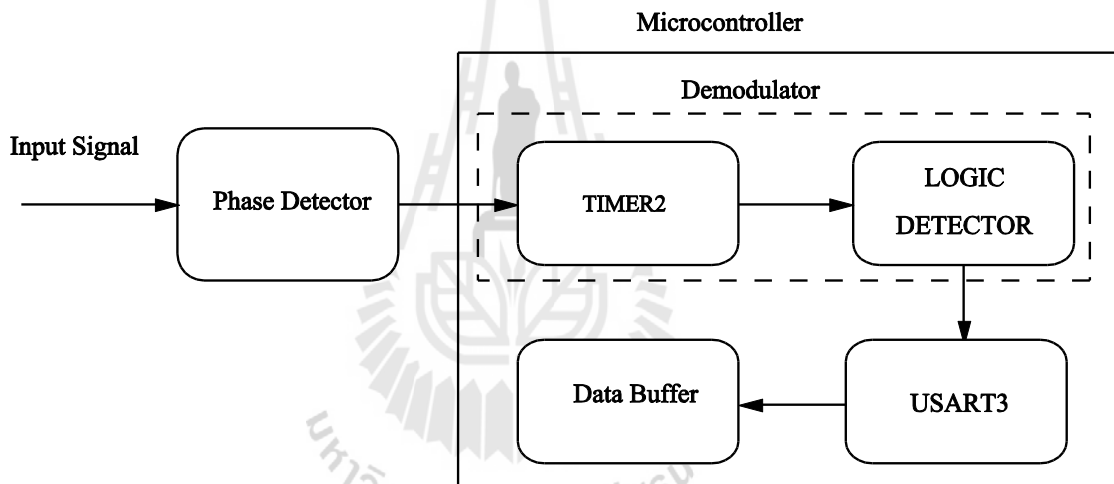
รูปที่ 4.10 การทำงานของวงจรขับสัญญาณเมื่อ PWM1 เป็น Low และ PWM2 เป็น High

จากสถานการณ์ทำงานของวงจรขับสัญญาณ สามารถแบ่งโหมดการทำงานออกเป็น 2 โหมด ได้แก่ โหมดการส่งสัญญาณ ซึ่งจะอยู่สถานะที่ 1 และ 2 โดยการรับสัญญาณความถี่พัลส์ PWM1 และ PWM2 มาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ และโหมดหยุดการส่งสัญญาณ หรือโหมดรับ

สัญญาณ ซึ่งจะอยู่สถานะที่ 3 โดยไมโครคอนโทรลเลอร์จะหยุดส่งสัญญาณความถี่ออกมา และกำหนดให้สถานะของสัญญาณ PWM1 และ PWM2 เป็น High และ Low ตามลำดับ

4.4 การออกแบบชุดรับสัญญาณข้อมูล

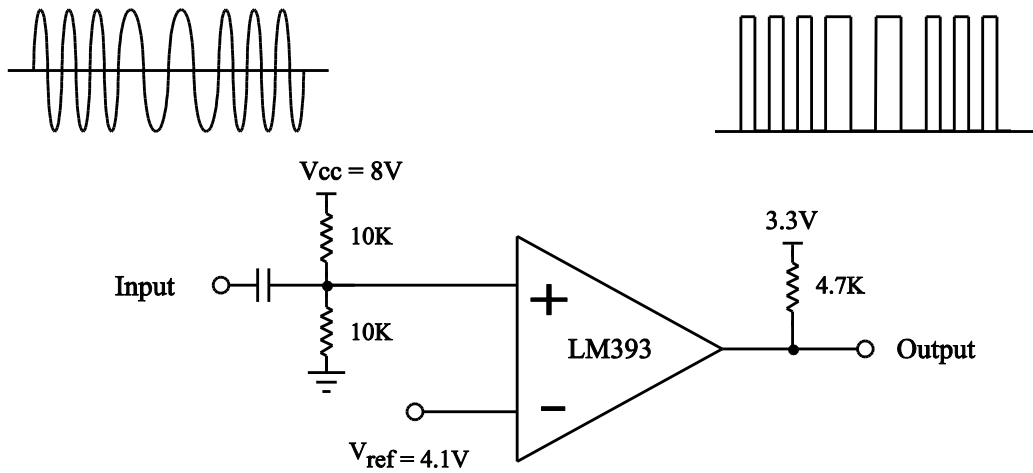
ชุดรับสัญญาณทำหน้าที่รับสัญญาณข้อมูลที่อยู่ในรูปสัญญาณคลื่นความถี่ ทำการแปลงให้เป็นสัญญาณข้อมูลแบบดิจิทัล โดยการนำสัญญาณที่ได้รับมาจากวงจรคู่ต่อ ซึ่งเป็นสัญญาณคลื่นความถี่แบบแอนะล็อก มาผ่านวงจรตรวจจับเฟส เพื่อแปลงให้เป็นสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม หรือสัญญาณความถี่แบบดิจิทัล นำมาทำการดีมอดูเลตสัญญาณ โดยใช้โมดูล TIMER2 ในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ สำหรับแปลงสัญญาณข้อมูลที่อยู่ในรูปคลื่นความถี่ ให้เป็นสัญญาณข้อมูลแบบดิจิทัล จากนั้นนำสัญญาณข้อมูลมาทำการถอดรหัสข้อมูล โดยใช้โมดูล USART3 ของไมโครคอนโทรลเลอร์ สำหรับจัดเก็บไว้ในหน่วยความจำของไมโครคอนโทรลเลอร์ และใช้ในการประมวลผลต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 โครงสร้างของชุดรับสัญญาณ

4.4.1 วงจรตรวจจับเฟสของสัญญาณคลื่นความถี่พาหะ

วงจรตรวจจับเฟส ทำหน้าที่แปลงสัญญาณคลื่นความถี่ที่เป็นสัญญาณแอนะล็อก ให้เป็นสัญญาณความถี่แบบดิจิทัล ก่อนส่งเข้าไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อตรวจวัดค่าความถี่ของสัญญาณ และทำการดีมอดูเลตสัญญาณ

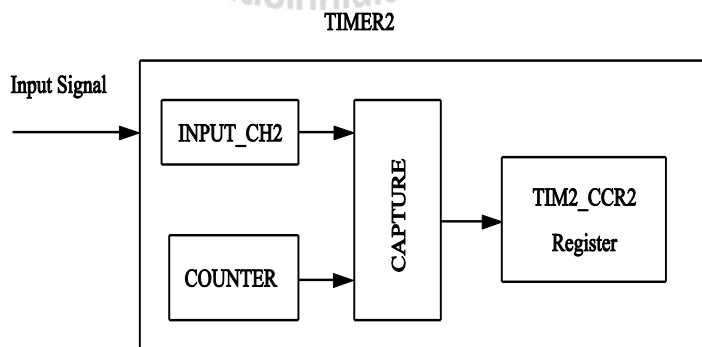


รูปที่ 4.12 วงจรตรวจจับเฟสของสัญญาณคลื่นความถี่ด้วย IC LM393

จากวงจรตรวจจับเฟสของสัญญาณ ดังรูปที่ 4.12 แสดงวงจรตรวจจับเฟส โดยใช้ IC LM393 ซึ่งเป็นไอซีออปแอมป์ชนิดเปรียบเทียบระดับแรงดันไฟฟ้า (comparator op-amp) โดยทำการตรวจจับสัญญาณด้านอินพุต ซึ่งเป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ ถ้าสัญญาณอินพุตมีระดับสูงกว่าระดับสัญญาณอ้างอิง สัญญาณเอาต์พุตจะเป็นลอจิก “high” ถ้าสัญญาณอินพุตมีระดับต่ำกว่าระดับสัญญาณอ้างอิง สัญญาณเอาต์พุตจะเป็นลอจิก “low”

4.4.2 การดีมอดูเลตสัญญาณโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

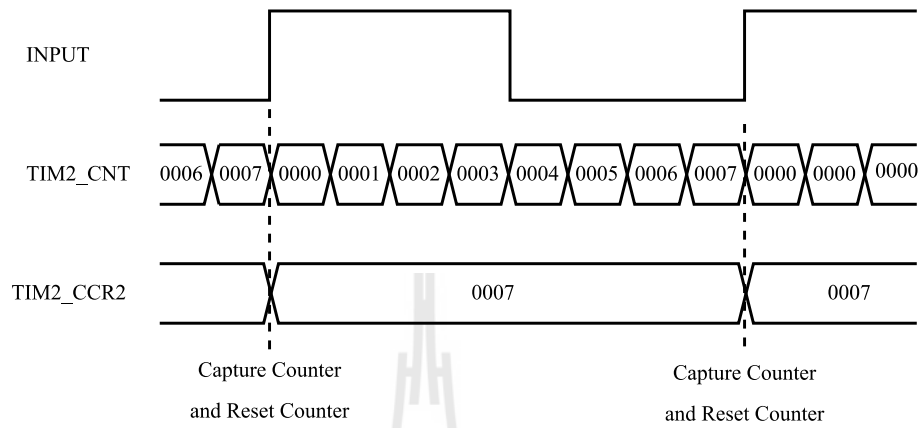
การดีมอดูเลตสัญญาณจากสัญญาณข้อมูลที่อยู่ในรูปคลื่นความถี่ ให้เป็นสัญญาณข้อมูลแบบดิจิทัล โมดูล TIMER2 ในโหมดตรวจจับสัญญาณ (capture mode) ของไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งเป็นโมดูลเวลา ถูกนำมาใช้ในการตรวจนับคาบเวลาในหนึ่งรอบของสัญญาณ เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความถี่ของสัญญาณ ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 บล็อกไดอะแกรมของ TIMER2 Capture Mode

การทำงานของโมดูล TIMER2 ในโหมดตรวจจับสัญญาณ พิจารณาจากรูปที่ 4.14 เริ่มจากการรับสัญญาณความถี่จากวงจรตรวจจับเฟส ซึ่งเป็นสัญญาณความถี่แบบดิจิทัล ทำการตรวจสอบ

รอบของสัญญาณ โดยการนับจำนวนรอบของตัวนับรีจิสเตอร์ TIM2_CNT ที่จุดเริ่มต้นถึงจุดสุดท้ายของรอบสัญญาณ ซึ่งกำหนดให้ความถี่ของตัวนับมีค่าเท่ากับความถี่ของสัญญาณนาฬิกาของไมโครคอนโทรลเลอร์ จำนวนรอบของเคาน์เตอร์ที่นับได้ จะถูกจัดเก็บไว้ในหน่วยความจำของรีจิสเตอร์ TIM2_CCR2 ซึ่งสามารถคำนวณค่าความถี่ของสัญญาณ ได้ดังสมการที่ 4.2

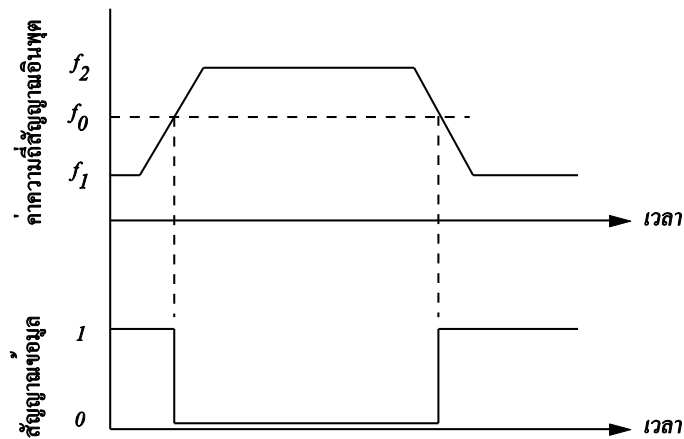


รูปที่ 4.14 การทำงานของ TIMER2 Capture Mode

$$Frequency = \frac{F_{CK}}{TIM2_CCR2 + 1} \quad (4.2)$$

เมื่อกำหนดให้ F_{CK} คือ ความถี่สัญญาณนาฬิกา เท่ากับ 72 MHz

จากค่าความถี่ของสัญญาณที่ได้จากโมดูล TIMER2 ซึ่งมีค่าความถี่เปลี่ยนแปลงตามค่าลอจิกของข้อมูล นำมาทำการตรวจสอบสถานะลอจิกข้อมูลของสัญญาณ โดยการเปรียบเทียบกับค่าความถี่อ้างอิง หรือความถี่ศูนย์กลาง (f_0) 127.8 kHz ซึ่งอยู่กึ่งกลางระหว่างค่าความถี่ f_1 และ f_2 ถ้าค่าความถี่ของสัญญาณอินพุตมีค่าน้อยกว่าค่าความถี่อ้างอิง จะได้สัญญาณข้อมูลที่เป็นลอจิก "1" ถ้าค่าความถี่ของสัญญาณอินพุตมีค่ามากกว่าค่าความถี่อ้างอิง จะได้สัญญาณข้อมูลที่เป็นลอจิก "0" ดังรูปที่ 4.15



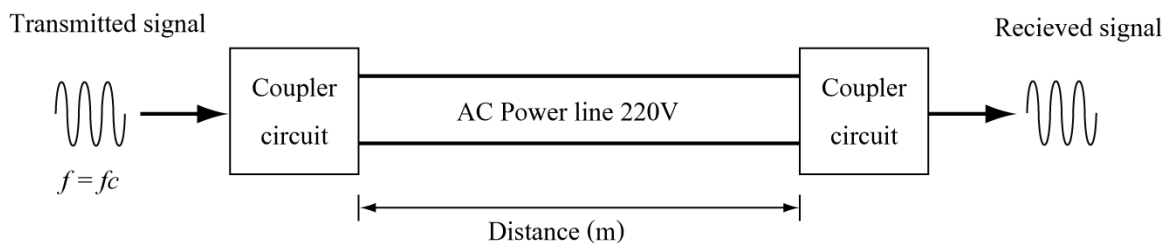
รูปที่ 4.15 การตรวจสอบลอจิกจากค่าความถี่ของสัญญาณอินพุต

4.4.3 การรับสัญญาณข้อมูล และการจัดเก็บข้อมูล

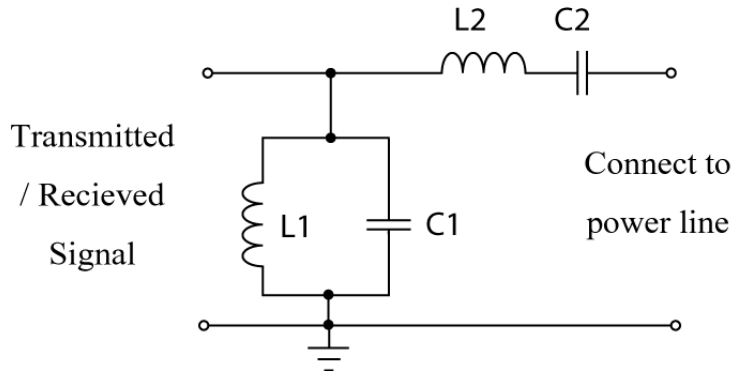
สัญญาณข้อมูลดิจิทัลที่ได้จากการเชื่อมต่อชุด ซึ่งเป็นสัญญาณข้อมูลแบบอนุกรม นำมาเข้าโมดูล USART3 ในโหมดการรับข้อมูล (receive mode) โดยกำหนดอัตราการรับส่งข้อมูลเป็น 4800 บิตต่อวินาที ข้อมูลที่ได้รับจะถูกบันทึกไว้ในรีจิสเตอร์ USART3_DR จากนั้นทำการอ่านข้อมูลจากรีจิสเตอร์ USART3_DR มาจัดเก็บไว้ในหน่วยความจำของไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อใช้ในการประมวลผลต่อไป

4.5 การหาค่าความถี่ของคลื่นความถี่พาหะที่เหมาะสม

ในการกำหนดค่าความถี่ของสัญญาณคลื่นความถี่พาหะ จะเริ่มจากการกำหนดช่วงของความถี่เบื้องต้น คือ 50 kHz – 200 kHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่สำหรับการสื่อสารแบบความถี่ต่ำ (narrowband) และเป็นช่วงความถี่ที่มีการใช้งานโดยทั่วไป จากนั้น ทำการทดสอบการส่งของสัญญาณที่ค่าความถี่อยู่ในช่วงที่กำหนดไปยังตัวรับสัญญาณที่ระยะต่าง ๆ เพื่อหาค่าความถี่ของสัญญาณที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 4.16 การทดสอบการรับส่งสัญญาณคลื่นความถี่ผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 4.17 วงจรคู่ต่อสำหรับการทดสอบการส่งสัญญาณคลื่นความถี่

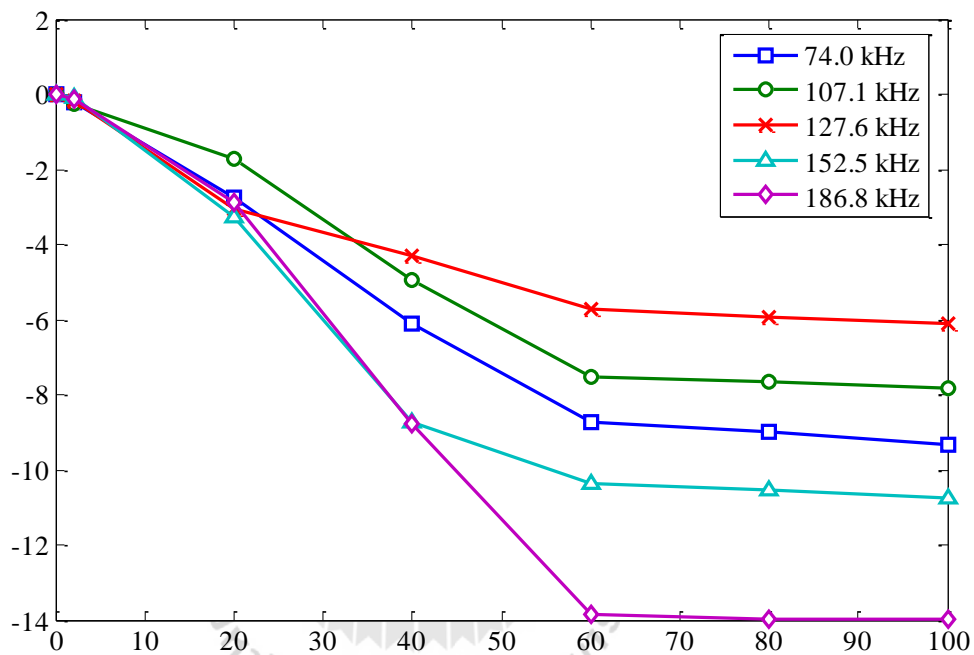
ในการทดสอบการส่งสัญญาณคลื่นความถี่พาหะผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้าสำหรับหาค่าความถี่ของคลื่นความถี่พาหะ ดังรูปที่ 4.16 แสดงการส่งสัญญาณความถี่ที่ได้จากตัวกำเนิดสัญญาณ ผ่านวงจรคู่ต่อ ไปยังสายส่งกำลังไฟฟ้า ซึ่งออกแบบให้ค่าความถี่เรโซแนนท์ หรือค่าความถี่ผ่านของวงจรคู่ต่อ มีค่าเท่ากับค่าความถี่ของสัญญาณคลื่นความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ และมีวงจรคู่ต่ออีกชุดทำหน้าที่เป็นตัวรับสัญญาณคลื่นความถี่ การทดลองนี้ได้ทำการทดสอบการรับส่งสัญญาณที่อาคารเครื่องมือ 3 ห้อง 3208 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยทำการติดตั้งตัวรับสัญญาณให้ห่างออกจากตัวส่งสัญญาณที่ระยะต่าง ๆ และทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณที่ได้จากตัวรับสัญญาณ โดยการเปลี่ยนค่าความถี่สัญญาณของตัวส่งคลื่นความถี่ และค่าความถี่ผ่านของวงจรเชื่อมต่อทั้งสองซึ่งอยู่ในช่วงที่กำหนด ดังรูปที่ 4.17 และทำการวัดสัญญาณรบกวน (noise) ที่มีอยู่ในสายส่งกำลังไฟฟ้า โดยการปลดตัวส่งสัญญาณความถี่ออก แล้วทำการวัดขนาดของสัญญาณรบกวนจากตัวรับสัญญาณ ซึ่งมีค่าความถี่ผ่านของวงจรเท่ากับค่าความถี่ของสัญญาณที่กำหนดไว้ ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณ อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนค่าความถี่

ความถี่ (kHz)	สัญญาณอินพุต (ตัวส่ง) (V)	สัญญาณเอาต์พุต (ตัวรับ) (V)							สัญญาณรบกวน
		ระยะทาง (m)							
		2	20	40	60	80	100		
74.0	4.30	4.20	3.13	2.13	1.57	1.53	1.47	0.233	
107.1	3.45	3.33	2.83	1.95	1.45	1.43	1.40	0.077	
127.8	3.23	3.17	2.27	1.97	1.67	1.63	1.60	0.060	
152.5	3.20	3.17	2.20	1.17	0.97	0.95	0.93	0.050	
186.8	3.10	3.05	2.23	1.13	0.63	0.62	0.62	0.035	

จากผลการทดสอบการส่งสัญญาณคลื่นความถี่ที่ความถี่ต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.2 สามารถนำมาคำนวณหาค่าอัตราขยายของสัญญาณที่ระยะ และความถี่ต่างๆ โดยการนำค่าขนาดของสัญญาณที่ได้วัดได้จากตัวรับสัญญาณเปรียบเทียบกับขนาดของสัญญาณที่วัดจากตัวส่งสัญญาณได้ดังนี้

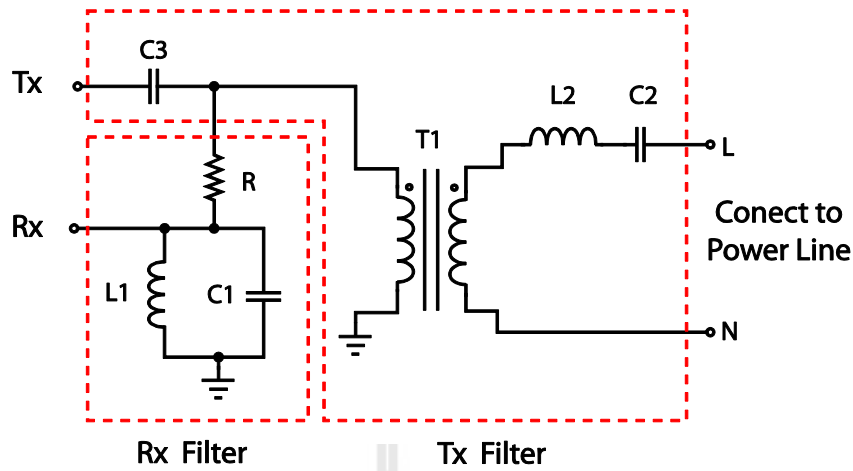
$$\text{อัตราขยาย} = 20 \log \left(\frac{\text{ขนาดของสัญญาณเอาต์พุต}}{\text{ขนาดของสัญญาณอินพุต}} \right) \text{ dB} \quad (4.3)$$



รูปที่ 4.18 อัตราการขยายสัญญาณที่ระยะต่างๆ เมื่อมีการเปลี่ยนค่าความถี่ของสัญญาณ

จากผลการทดสอบการส่งสัญญาณที่ค่าความถี่ต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.18 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มระยะห่างของตัวส่งสัญญาณกับตัวรับสัญญาณ ที่ค่าความถี่เดียวกันจะทำให้ขนาดของสัญญาณที่วัดได้จากตัวรับสัญญาณมีค่าลดลง และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนค่าความถี่ของสัญญาณ จะพบว่าขนาดของสัญญาณที่วัดได้จากระยะห่าง 40, 60, 80 และ 100 เมตร มีค่าสูงสุดที่ค่าความถี่ของสัญญาณเท่ากับ 127.8 kHz และที่ค่าความถี่ดังกล่าวมีขนาดของสัญญาณรบกวนอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้ค่าความถี่ของสัญญาณคลื่นความถี่พาหะเท่ากับ 127.8 kHz ซึ่งค่าความถี่ที่เลือกใช้อาจเปลี่ยนแปลงตามสถานที่ที่ใช้ในการทดสอบ หรือใช้งาน

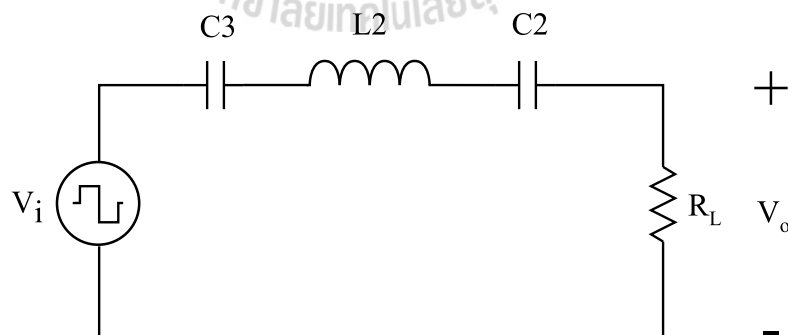
4.6 การออกแบบวงจรเชื่อมต่อ



รูปที่ 4.19 วงจรเชื่อมต่อสำหรับรับสัญญาณ และส่งสัญญาณ

จากรูปวงจรคู่ต่อ ดังรูปที่ 4.19 ประกอบด้วยวงจรกรองแถบความถี่สำหรับการส่งสัญญาณ และรับสัญญาณ โดยวงจรกรองแถบความถี่ผ่านสำหรับการส่งสัญญาณจะป้องกันไม่ให้ความถี่ต่ำผ่านเข้าไปยังหม้อแปลง และให้สัญญาณคลื่นความถี่ที่ต้องการส่งออกมีขนาดแรงดันสูงสุด และใน ส่วนวงจรกรองแถบความถี่ผ่านสำหรับการรับสัญญาณ ทำหน้าที่ตัดสัญญาณรบกวนและความถี่อื่นที่ไม่ต้องการออกจากสัญญาณของข้อมูล และมีหม้อแปลงความถี่สูงทำหน้าที่แยกกราวด์ของสายส่งกำลังไฟฟ้ากับกราวด์ของวงจรของโมดูลสื่อสารออกจากกัน

4.6.1 การออกแบบวงจรกรองความถี่ผ่านสำหรับการส่งสัญญาณ



รูปที่ 4.20 วงจรกรองแถบความถี่สำหรับการส่งสัญญาณ

จากวงจรเชื่อมต่อรูปที่ 4.19 สามารถจัดรูปของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านสำหรับการส่งสัญญาณใหม่โดยพิจารณาคุณสมบัติของหม้อแปลงให้เป็นหม้อแปลงในอุดมคติ ทำให้สามารถจัด

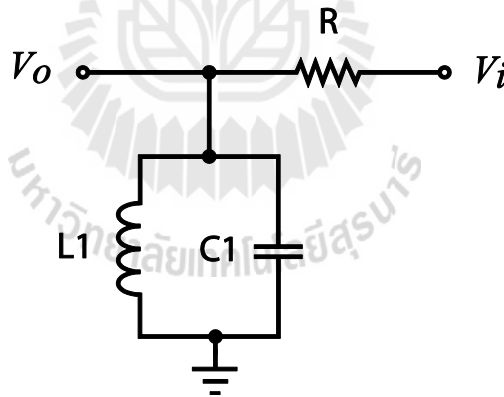
รูปวงจรให้อยู่ในรูปวงจรมมูลได้ดังรูปที่ 4.20 ในการออกแบบกำหนดค่าความถี่เรโซแนนท์ของวงจรให้เท่ากับค่าความถี่ศูนย์กลางของความถี่คลื่นพาหะ และกำหนดค่าของตัวเก็บประจุ C_2 และ C_3 ซึ่งโดยปกติจะกำหนดให้ค่าของตัวเก็บประจุ C_2 มีค่าน้อยกว่า C_3 มาก จึงเลือกพิจารณาเฉพาะ C_2 ซึ่งกำหนดค่า $C_2 = 47 \mu\text{F}$ กำหนดค่าตัวเหนี่ยวนำ L_2 ได้จากสมการค่าความถี่เรโซแนนท์ของวงจร ดังนี้

$$f_0 = \frac{1}{(2\pi\sqrt{L_2C_3})} \quad (4.4)$$

$$\text{จะได้ } L_2 = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 C_3} = \frac{1}{(2\pi \times 127.8 \times 10^3)^2 \times 47 \times 10^{-9}} = 33 \mu\text{F}$$

4.6.2 การออกแบบวงจรกรองความถี่ผ่านสำหรับการรับสัญญาณ

วงจรกรองความถี่ผ่านสำหรับการรับสัญญาณประกอบด้วยวงจรเรโซแนนท์แบบอนุกรม และแบบขนาน ดังรูปที่ 4.21 ทำหน้าที่ตัดสัญญาณรบกวนและความถี่อื่นที่ไม่ต้องการออก จากสัญญาณของคลื่นความถี่พาหะ และมีการกำหนดแถบความถี่ผ่าน (band width) อยู่ในช่วงความถี่ตัดด้านต่ำ (f_{C1}) ถึงความถี่ตัดด้านสูง (f_{C2})



รูปที่ 4.21 วงจรกรองแถบความถี่สำหรับการรับสัญญาณ

จากวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน ดังรูปที่ 4.21 เมื่อกำหนดให้ $L = L_2$ และ $C = C_2$ สามารถหาฟังก์ชันการถ่ายโอนได้ดังนี้

$$H(s) = \frac{\frac{s}{RC}}{s^2 + \frac{s}{RC} + \frac{1}{LC}} \quad (4.5)$$

และมีสมการ Quality factor

$$Q = R\sqrt{\frac{C}{L}} \quad (4.6)$$

$$Q = \frac{f_0}{BW} \quad (4.7)$$

จากผลตอบสนองของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านจะได้ความสัมพันธ์

$$BW = f_{C2} - f_{C1} \quad (4.8)$$

$$f_0 = \sqrt{f_{C1} \times f_{C2}} \quad (4.9)$$

เมื่อ BW คือ ความกว้างของแถบความถี่ผ่าน

f_{C1} คือ ค่าความถี่ตัดด้านต่ำ

f_{C2} คือ ค่าความถี่ตัดด้านสูง

จากสมการที่ 4.8 และ 4.9 สามารถคำนวณหา f_{C1} และ f_{C2} ได้ดังนี้

$$f_{C1} = \sqrt{\frac{BW^2}{4} + f_0^2} - \frac{BW}{2} \quad (4.10)$$

$$f_{C2} = BW + f_{C1} \quad (4.11)$$

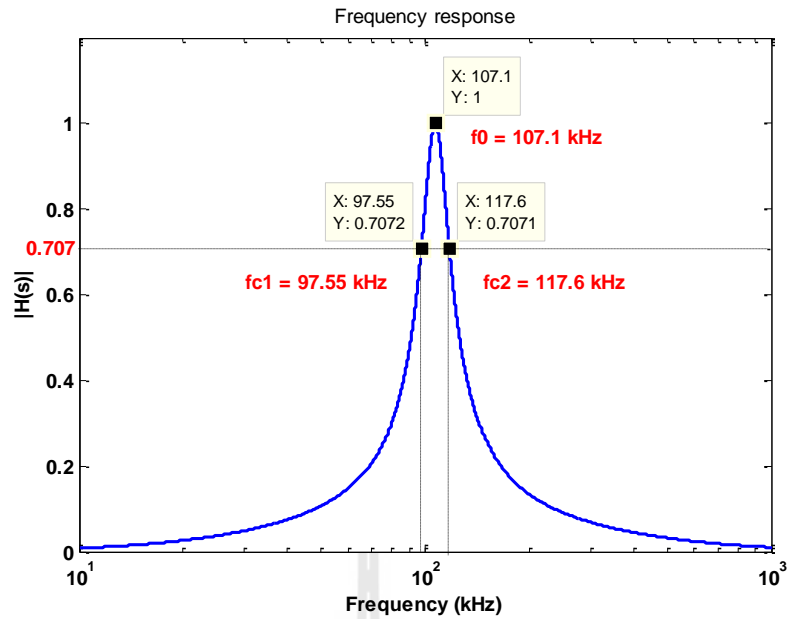
ในการออกแบบต้องการให้ความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านเท่ากับ 127.8 kHz และมีความกว้างของช่วงแบนด์วิดท์เท่ากับ 20 kHz ซึ่งสามารถคำนวณค่า Q ได้เป็น

$$Q = \frac{f_0}{BW} = \frac{127.8 \text{ kHz}}{20 \text{ kHz}} = 6.39$$

จากสมการที่ 4.6 สามารถคำนวณหาความต้านทาน R ได้ ดังนี้

$$R = Q \sqrt{\frac{L}{C}} = 6.39 \sqrt{\frac{33 \times 10^{-6}}{47 \times 10^{-9}}} = 169.32 \Omega \approx 170 \Omega$$

จากค่าของอุปกรณ์ที่คำนวณได้ นำมาทดสอบการตอบสนองทางความถี่ของวงจร โดยใช้ฟังก์ชันการถ่ายโอนดังสมการที่ (4.2) เพื่อจำลองผลการตอบสนองของสัญญาณที่ความถี่ต่าง ๆ ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยกำหนดให้ $L1 = L2 = 47 \mu\text{H}$ และ $C2 = C3 = 47 \text{ nF}$ จะได้ผลตอบสนองความถี่ดังกราฟในรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรที่ออกแบบ

4.7 สรุป

บทที่ 4 นำเสนอรายละเอียดของวงจรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง การออกแบบการส่งสัญญาณ การรับสัญญาณ วงจรเชื่อมต่อ รวมถึงการทดลองต่าง ๆ เพื่อทดสอบหาค่าปรับตั้งที่เหมาะสมของระบบการส่งข้อมูลผ่านสายไฟฟ้าสำหรับงานวิจัยนี้ รายละเอียดต่าง ๆ การจำลองผลและผลการทดสอบความมีประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลจะกล่าวถึงในบทถัดไป

บทที่ 5

ผลการทดสอบ

5.1 กล่าวนำ

การทดสอบดำเนินการเป็น 2 ลักษณะ ประกอบด้วย การจำลองผลการสื่อสารผ่านสายไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink และการทดสอบส่งข้อมูลผ่านสายไฟฟ้าเพื่อประเมินประสิทธิภาพการส่งข้อมูลผ่านสายไฟฟ้า โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.2 การจำลองสัญญาณข้อมูลอนุกรมแบบอะซิงโครนัส

สัญญาณข้อมูลที่ใช้ในการจำลองการส่งสัญญาณจะเป็นลักษณะของการส่งสัญญาณข้อมูลอนุกรมแบบอะซิงโครนัส กำหนดอัตราการส่งข้อมูลเป็น 5000 บิตต่อวินาที (bps) โดยการจำลองสัญญาณของข้อมูลด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งเป็นลำดับของสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่อง (discrete signal sequent) กำหนดค่าความถี่ของการชักตัวอย่าง (sampling frequency, f_s) เป็น 200000 Hz ซึ่งสามารถคำนวณอัตราการส่งข้อมูลที่เป็นลำดับของสัญญาณได้ดังนี้

$$BRn = \frac{BR}{f_s} \quad (5.1)$$

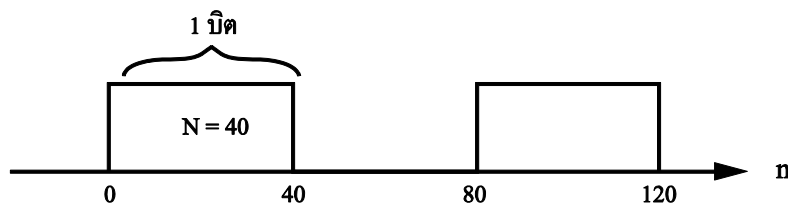
จากสมการที่ 5.1 จะได้

$$BRn = \frac{5000}{200000} = 0.025 \text{ บิตต่อรอบ}$$

เมื่อ BRn คือ อัตราการส่งข้อมูลของลำดับสัญญาณ (บิตต่อรอบ)

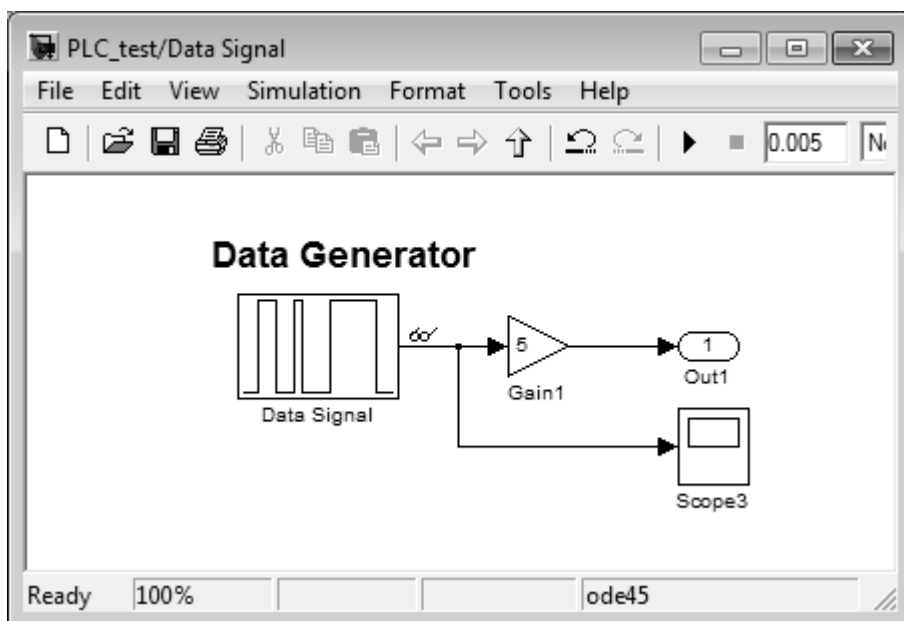
BR คือ อัตราการส่งข้อมูล (บิตต่อวินาที)

นั่นคือ ความยาวลำดับของสัญญาณต่อข้อมูล 1 บิต มีค่าเท่ากับ 40 รอบ ดังรูปที่ 5.1

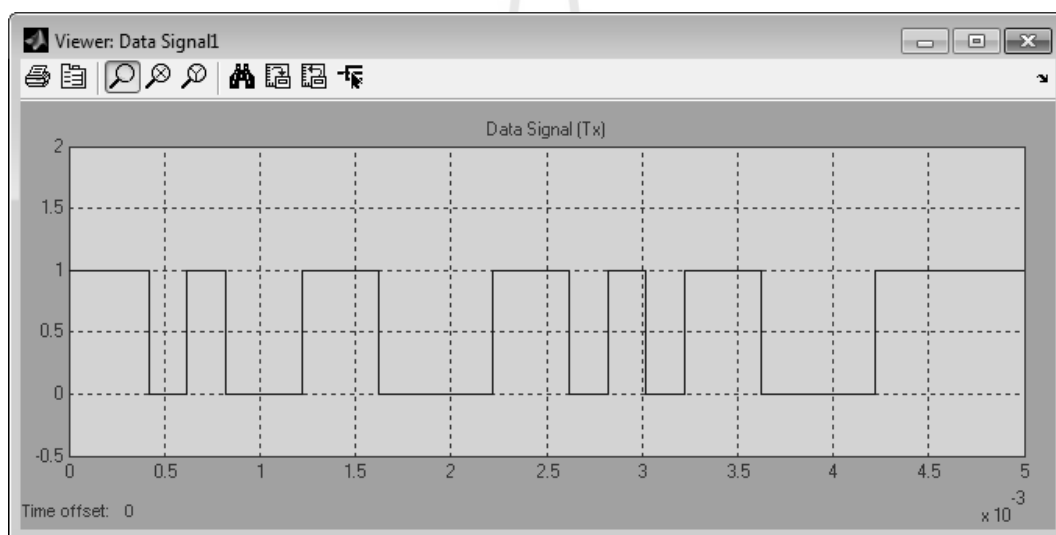


รูปที่ 5.1 ลำดับของสัญญาณข้อมูล

ลำดับของสัญญาณข้อมูลจะถูกสร้างขึ้นในโปรแกรม MATLAB (.m file) ซึ่งจะถูกริยกรใช้งานด้วยโปรแกรม Simulink เพื่อนำไปแสดงผล ดังรูปที่ 5.2 และส่งไปยังส่วนของการมอดูเลตต่อไป



รูปที่ 5.2 การกำหนดสัญญาณข้อมูลด้วยโปรแกรม Simulink



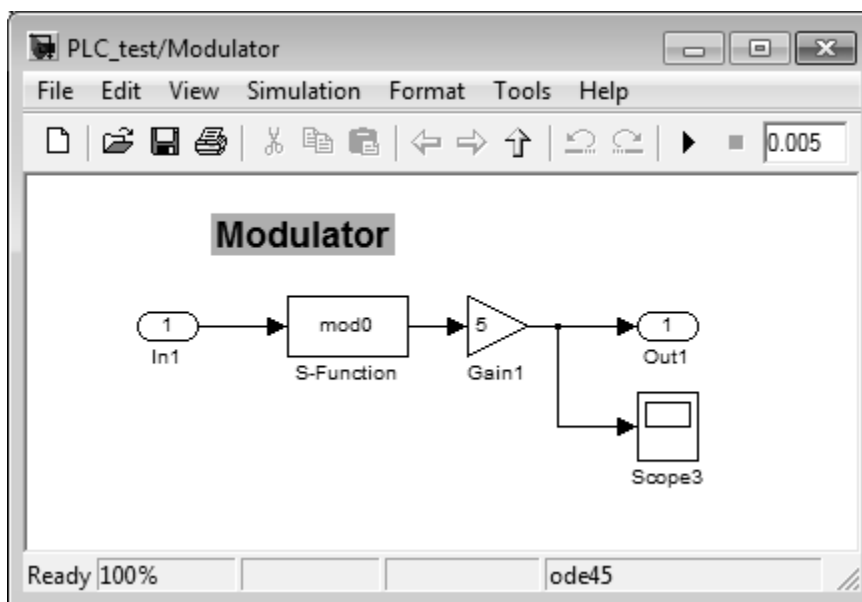
รูปที่ 5.3 สัญญาณข้อมูลที่ได้จากการจำลองผล

จากสัญญาณของข้อมูล ดังรูปที่ 5.3 แสดงสัญญาณข้อมูลที่ได้จากการจำลองผลด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งมีขนาดของข้อมูล 2 ไบต์ และมีค่าของข้อมูลเป็น 0x198D ในเลขฐาน 16 หรือ 6541 ในเลขฐาน 10

5.3 การจำลองผลสำหรับการมอดูเลตสัญญาณข้อมูล

ในส่วนของการมอดูเลตสัญญาณข้อมูล จะทำการตรวจสอบค่าลอจิกของสัญญาณข้อมูลที่เข้ามาในแต่ละลำดับของสัญญาณ เพื่อนำไปกำหนดค่าความถี่ของสัญญาณ ในฟังก์ชันกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ในโปรแกรม MATLAB ซึ่งใช้เป็นสัญญาณคลื่นความถี่พาหะสำหรับการรับส่งข้อมูล

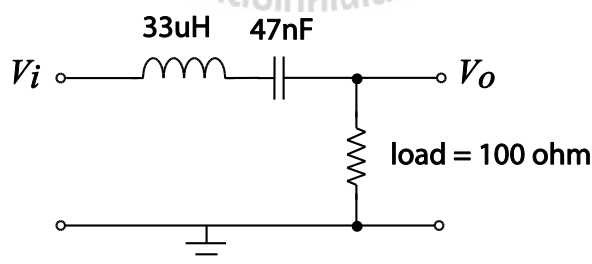
โดยค่าความถี่ของสัญญาณจะมีค่าเป็น 122.8 kHz ถ้าค่าลอจิกของสัญญาณข้อมูลเป็น “1” และค่าความถี่ของสัญญาณจะมีค่าเป็น 132.8 kHz ถ้าค่าลอจิกของสัญญาณข้อมูลเป็น “0” ซึ่งโค้ดของโปรแกรมจะสร้างขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB (.m file) แล้วถูกเรียกใช้ด้วยโปรแกรม Simulink ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 การมอดูเลตสัญญาณด้วยโปรแกรม Simulink

5.4 แบบจำลองวงจรเชื่อมต่อสำหรับการส่งสัญญาณและรับสัญญาณ

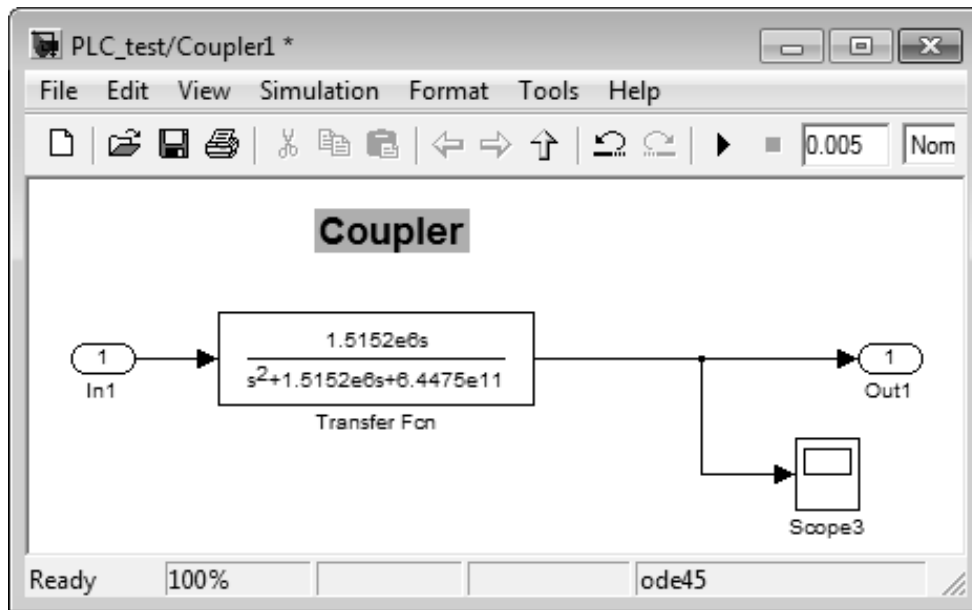
แบบจำลองของวงจรเชื่อมต่อสำหรับการส่งสัญญาณ และรับสัญญาณ สามารถหาได้จากฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจร ซึ่งมีลักษณะคุณสมบัติเป็นวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน ซึ่งรายละเอียดการออกแบบได้กล่าวไว้ในบทที่ 4



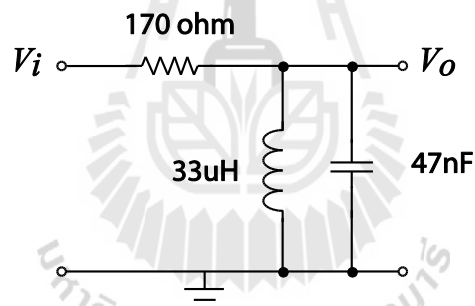
รูปที่ 5.5 วงจรเชื่อมต่อสัญญาณสำหรับการส่งสัญญาณ

จากวงจรดังรูปที่ 5.5 และแผนภาพการจำลองผลวงจรด้วย Simulink ในรูปที่ 5.6 สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรเชื่อมต่อสำหรับการส่งสัญญาณ ได้ดังนี้

$$H(s) = \frac{1.5152 \times 10^6 s}{s^2 + 1.5152 \times 10^6 s + 6.4475 \times 10^{11}} \quad (5.2)$$



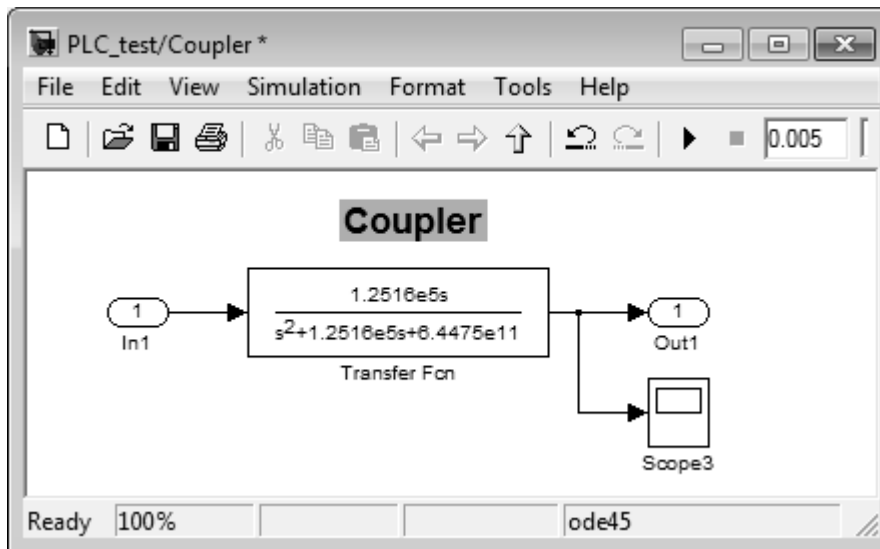
รูปที่ 5.6 การจำลองผลของวงจรเชื่อมต่อสำหรับการส่งสัญญาณด้วยโปรแกรม Simulink



รูปที่ 5.7 วงจรเชื่อมต่อสำหรับการรับสัญญาณ

จากวงจรดังรูปที่ 5.7 และแผนภาพการจำลองผลวงจรด้วย Simulink ในรูปที่ 5.8 สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรเชื่อมต่อสำหรับการรับสัญญาณ ได้ดังนี้

$$H(s) = \frac{1.2516 \times 10^5 s}{s^2 + 1.2516 \times 10^5 s + 6.4475 \times 10^{11}} \quad (5.3)$$

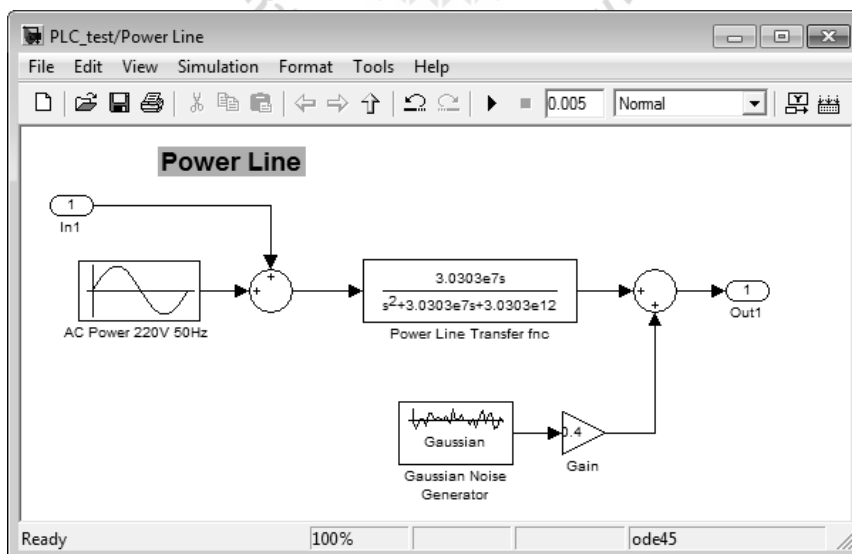


รูปที่ 5.8 การจำลองผลของวงจรเชื่อมต่อสำหรับการรับสัญญาณด้วยโปรแกรม Simulink

5.5 แบบจำลองสายส่งกำลังไฟฟ้าและสัญญาณรบกวน

ในส่วนของสายส่งกำลังไฟฟ้า ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดสัญญาณกำลังไฟฟ้า 220V/50Hz และสัญญาณรบกวน โดยกำหนดให้เป็นแบบ Gaussian noise ซึ่งสามารถปรับขนาดของสัญญาณ ได้จากการเปลี่ยนค่าความแปรปรวน (variance) และกำหนดฟังก์ชันถ่ายโอนของสายส่งกำลังไฟฟ้าดังสมการที่ 5.4 โดยสร้างเป็นแผนภาพจำลองวงจรได้ดังรูปที่ 5.9

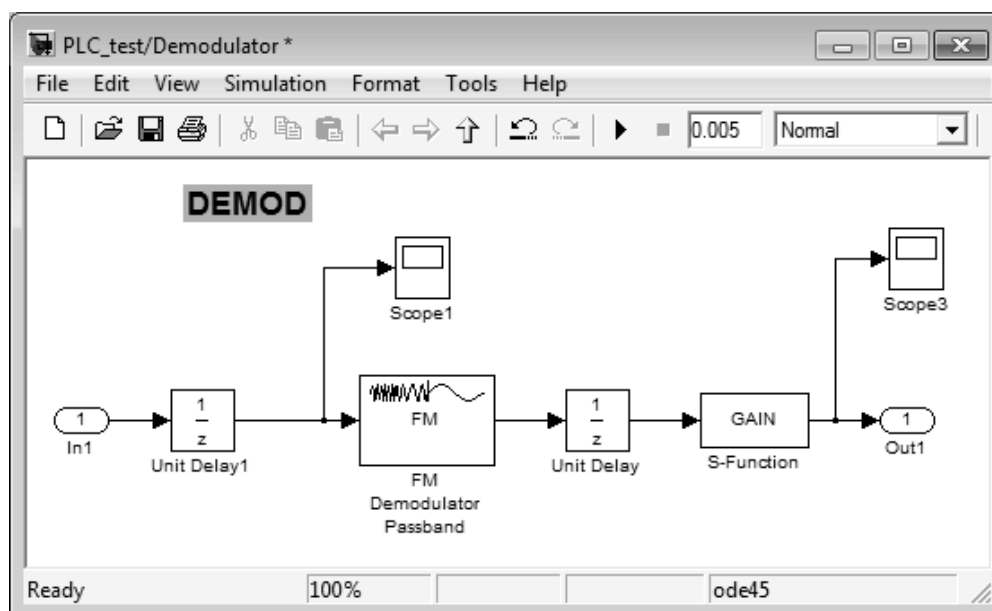
$$H(s) = \frac{3.0303 \times 10^7 s}{s^2 + 3.0303 \times 10^7 s + 3.0303 \times 10^{12}} \quad (5.4)$$



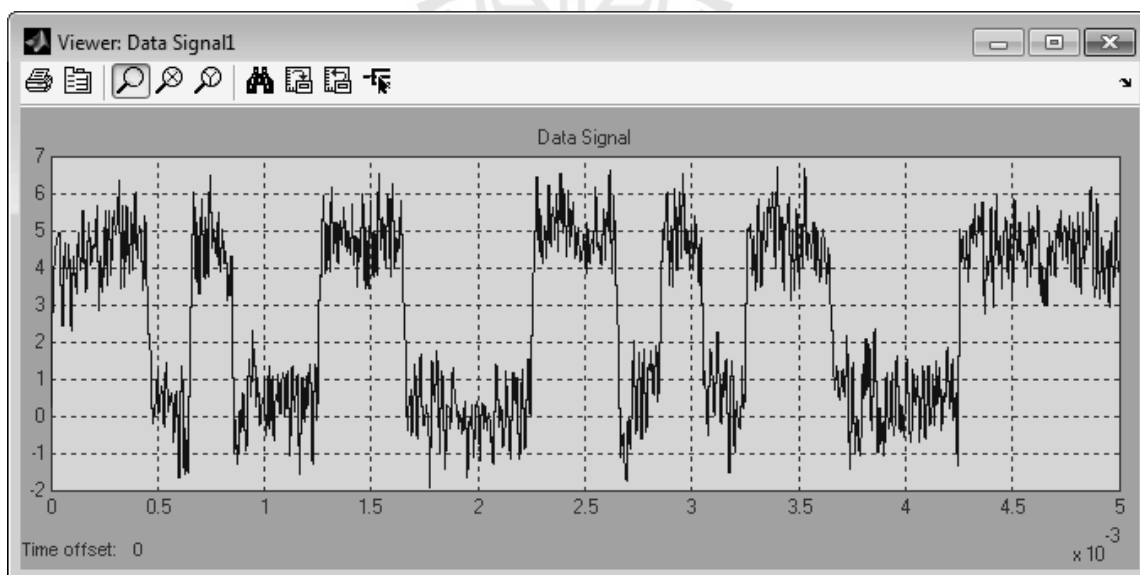
รูปที่ 5.9 ชุดจำลองการส่งข้อมูลผ่านสายไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Simulink

5.6 การจำลองการดีมอดูเลตสัญญาณข้อมูล

ในส่วนของการดีมอดูเลตสัญญาณจะใช้ฟังก์ชันดีมอดูเลเตอร์ทางความถี่ (FM demodulator function) ที่มีอยู่ในโปรแกรม Simulink ทำหน้าที่แปลงสัญญาณความถี่ ให้เป็นสัญญาณผลต่างของค่าความถี่ ซึ่งสอดคล้องกับสัญญาณข้อมูลที่ได้รับ ดังรูปที่ 5.10

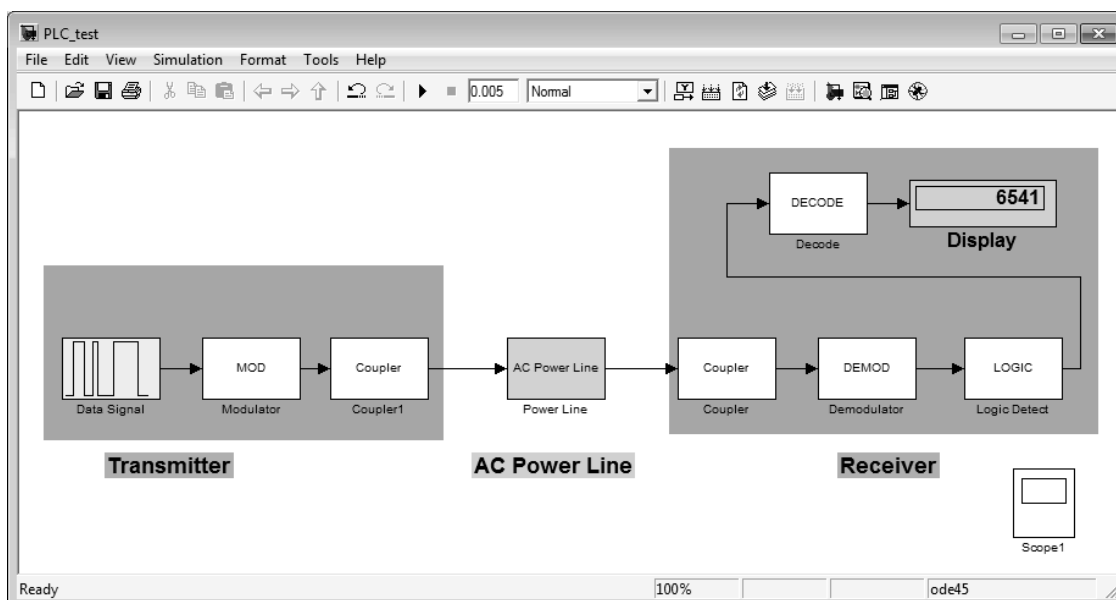


รูปที่ 5.10 การดีมอดูเลตสัญญาณด้วยโปรแกรม Simulink



รูปที่ 5.11 สัญญาณข้อมูลที่ได้จากการดีมอดูเลตสัญญาณ

ในการทดสอบการรับส่งข้อมูล ทดสอบโดยการเปรียบเทียบค่าของข้อมูลขนาด 2 ไบต์ ที่ส่งจากตัวส่งสัญญาณ กับตัวรับสัญญาณว่าตรงกันหรือไม่ และทำการปรับค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนในสายส่งกำลังไฟฟ้า เพื่อทดสอบผลของค่าความแปรปรวนที่มีต่อค่าความผิดพลาดของข้อมูลที่ได้รับ ระบบการทดสอบโดยใช้ MATLAB/Simulink นี้แสดงไว้ในรูปที่ 5.12 ได้ผลการเปรียบเทียบข้อมูลประสิทธิภาพการรับ/ส่งดังตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.12 การทดสอบระบบการรับส่งสัญญาณข้อมูลด้วยโปรแกรม Simulink

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการรับส่งสัญญาณข้อมูลต่อขนาดของสัญญาณรบกวน

ความแปรปรวน	ข้อมูลที่ส่ง	ข้อมูลที่รับ	ความผิดพลาด (บิต)
0.0	6541	6541	0
0.5	6541	6541	0
1.0	6541	6413	1
1.5	6541	6157	2
2.0	6541	6144	5
2.5	6541	2048	6
3.0	6541	2048	6

5.7 ผลการทดลอง

การทดสอบรับส่งข้อมูลดำเนินการทดสอบผ่านสายส่งไฟฟ้า 220 VAC, 50 Hz ระยะสายส่งทดสอบยาว 100 เมตร ทำการทดสอบด้วยการส่งข้อมูลจำนวนทั้งสิ้น 10000 ชุด ทำการวัดคุณภาพ

ของข้อมูลผ่านการประเมินด้วยดัชนี SNR (signal to noise ratio) และ SA (signal attenuation) ดังความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$SNR_{dB} = 20 \log \left(\frac{A_{signal}}{A_{noise}} \right) \text{ dB} \quad (5.5)$$

$$SA = 10 \log \left(\frac{P_i}{P_o} \right) \text{ dB} \quad (5.6)$$

โดยที่

A_{signal} คือ ขนาดของสัญญาณข้อมูลเป็นค่า RMS

A_{noise} คือ ขนาดของสัญญาณรบกวนเป็นค่า RMS

P_i คือ กำลังของสัญญาณที่ตัวส่ง

P_o คือ กำลังของสัญญาณที่ตัวรับ

การทดสอบดำเนินการเปลี่ยนแปลงระยะทางในการส่งข้อมูลจาก 0 – 100 เมตร โดยแบ่งออกเป็น 6 ระยะทาง ได้แก่ 5 เมตร 20 เมตร 40 เมตร 60 เมตร 80 เมตร และ 100 เมตร ทุกระยะทาง ทดสอบด้วยข้อมูลจำนวน 10000 ชุด ได้ผลทดสอบดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการรับส่งสัญญาณข้อมูลต่อระยะทางส่ง

Line length (m)	SA (dB)	SNR (dB)
5	0.44	23.2
20	0.64	22.5
40	1.02	20.6
60	1.16	20.1
80	2.68	19.5
100	3.51	19.2

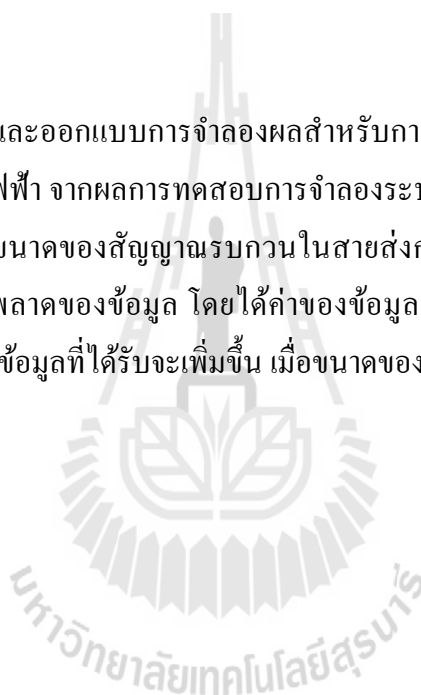
นอกจากนี้ ได้ทำการทดสอบ CRC (cyclic redundancy check) จากรูปแบบของข้อมูลที่ส่ง องค์ประกอบ CRC จะถูกสุ่มค่าแล้วส่งไปพร้อมกับข้อมูล เพื่อทำการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของการรับ/ส่งข้อมูล ผลการตรวจสอบข้อมูลที่ได้ผลดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการรับส่งสัญญาณข้อมูลด้วย CRC

Line length (m)	Number of data transfer error	
	Data comparison	Examining by CRC
5	0	0
20	1	1
40	1	1
60	3	3
80	5	5
100	6	6

5.8 สรุป

บทนี้ได้ทำการศึกษา และออกแบบการจำลองผลสำหรับการสื่อสารผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า และทดสอบส่งข้อมูลในสายไฟฟ้า จากผลการทดสอบการจำลองระบบการส่งสัญญาณข้อมูลในสายส่งกำลังไฟฟ้า เมื่อทำการเพิ่มขนาดของสัญญาณรบกวนในสายส่งกำลังไฟฟ้า พบว่าข้อมูลที่ได้รับจากตัวรับสัญญาณมีความผิดพลาดของข้อมูล โดยได้ค่าของข้อมูลที่ได้ไม่ตรงกับข้อมูลจากตัวส่งสัญญาณ ซึ่งความผิดพลาดของข้อมูลที่ได้รับจะเพิ่มขึ้น เมื่อขนาดของสัญญาณรบกวนมีค่าเพิ่มขึ้น



บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการสื่อสารข้อมูลผ่านสายส่งไฟฟ้า โดยเน้นไปที่สายส่งไฟฟ้าแรงต่ำที่ใช้งานกันในอาคาร บ้านเรือน ที่พักอาศัย อาคารสำนักงาน โรงงานอุตสาหกรรม สถานประกอบการต่าง ๆ ด้วยระบบแรงดันเฟสเดียว 220 V 50 Hz การส่งข้อมูลใช้การมอดูเลตสัญญาณข้อมูลกับความถี่พาหะในรูปแบบ FSK การเชื่อมต่อชุดส่งและรับข้อมูลใช้วงจรกรองพาหะซีฟแบบความถี่สูงผ่านที่มีโครงสร้างแบบวงจรเรโซแนนซ์แอลซี (LC resonant circuit) การออกแบบพารามิเตอร์ของวงจรเชื่อมต่อแสดงไว้ในบทที่ 4 รวมทั้งการจำลองผลและการทดสอบการส่ง/รับสัญญาณข้อมูลในบทที่ 5 ผลการทดสอบยืนยันได้ว่า ระยะทางส่งที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนในการส่งข้อมูลโดยมีอัตราการส่งข้อมูลคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ความยาว 100 เมตร เป็น 6 ใน 10000 (0.0006)

งานวิจัยต่อยอดจากชุดรับส่งสัญญาณต้นแบบนี้สามารถนำมาดัดแปลงเพื่อนำไปใช้งานส่งข้อมูลจากเครื่องวัดกำลังงานไฟฟ้าผ่านสายไฟฟ้าได้ เพื่อวัตถุประสงค์ในการเฝ้าตรวจพลังงานไฟฟ้าจากระยะไกลโดยไม่ต้องติดตั้งสายสื่อสารข้อมูลเพิ่มเติม

6.2 ข้อเสนอแนะ

1) การส่งข้อมูลผ่านสายไฟฟ้าจะมีปัญหาเมื่อมีหม้อแปลงกำลังต่อคั่นระหว่างตัวส่งและตัวรับสัญญาณ เนื่องจากคุณสมบัติของหม้อแปลงที่เป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ทำให้สัญญาณข้อมูลความถี่สูงถูกกรองทิ้งไป แนวทางในการแก้ปัญหาอาจจะดำเนินการโดยการการพัฒนาจันทวนสัญญาณ (repeater) เพื่อให้สามารถส่งข้อมูลข้ามหม้อแปลงได้

2) การทดสอบในงานวิจัยนี้จำกัดอยู่ที่ความยาวสาย 100 เมตร การปรับปรุงงานวิจัยสามารถดำเนินการเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลผ่านสายไฟฟ้าให้มีระยะทางไกลมากขึ้น

บรรณานุกรม

1. อนุศาสน์ วรรณโท, สุพจน์ เสมรอด, “การวิเคราะห์ทรานเซียนต์ในระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้โปรแกรม ATP-EMTP”, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2546 .
2. คณะกรรมการมาตรฐาน กทช., “มาตรฐานทางเทคนิคสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารผ่านสายไฟฟ้า (Power Line Communications – PLC)”, สำนักงานคณะกรรมการกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ , ธันวาคม 2550
3. เจนจบ วีระพานิชเจริญ, “ การสื่อสารบรอดแบนด์ความเร็วสูงผ่านสายไฟฟ้า”, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
4. T. Thanasaksiri , *Non-Member, RERIC*, “Comparison of Simulation Tools ATPDraw and TFlash for Lightning Overvoltage Studies”, ChiangMai University
5. T.Tran-Anh, P.Auriol, T.Tran-Quoc , “Distribution network modeling for Power Line
6. Communication applications”, IEEE Trans. On PowerDelivery , 2005 , pp. 361 – 365.
7. Morched (SM) L. Mad (M) J. Ottevangers , “A High Frequency Transformer Model for the EMTP” , IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 8, No. 3. July 1993 , pp. 1615 - 1626
8. X. Wang, A.D. Yerrabelli, R.P. Quest, C.P. Kinne, “Power Line Carrier Communications System Modeling”.IEEE,2005 .
9. W. Liu, H. Widmer and P. Raffin. “Broadband PLC Access Systems and Field Deployment in European Power Line Networks”, IEEE Communications Magazine, pp. 114-118, May. 2003.
10. F. Pacheco, M. Lobashov, M. Pinho and G. Pratl, “A power line communication stack for metering, SCADA and large-scale domotic applications”, Int. Symp. Power Line Communications and Its Applications, 6-8 April 2005, pp. 61 – 65
11. J.V. Wijayakulasooriya, D.M.I.S. Dasanayake, P.I. Muthukumarana, H.M.P.P. Kumara, L.A.D.S.D. Thelisinghe, “Remotely Accessible Single Phase Energy Measuring System”, International Conference on Industrial and Information Systems, ICIIS 2006, 8 - 11 August 2006, Sri Lanka
12. G.B. Maizonave, D. Reis and F.S. Lima, “Integrated System for Intelligent Street Lighting”, in Proc. Inst. Elect., IEEE Int. Sym. Power-line Comm., vol. 2, pp. 721 – 726, Montreal, Que. 9 -13 July 2006.
13. R. Tongia, “Can broadband over powerline carrier (PLC) compete? A techno-economic analysis”, Telecommunication Policy, Vol. 28, pp. 559 – 578, 2004

14. W. Liu, H. Widmer and P. Raffin “Broadband PLC Access Systems and Field Deployment in European Power Line Networks”, IEEE Communications Magazine, pp. 114-118, May. 2003.
15. J.V. Wijayakulasooriya, “Remotely Accessible Single Phase Energy Measuring System”, in Proc. 1st Int. Conf. and Info Syst, ICIIS 2006, pp.304-309, Peradeniya, 8-11 Aug. 2006.
16. F. Pacheco, M. Lobashov, M. Pinho and G. Pratl, “A power line communication stack for metering, SCADA and large-scale domotic applications”, Int. Symp. Power Line Communications and Its Applications, 6-8 April 2005, pp. 61 – 65



ภาคผนวก ก
ผลผลิตจากงานวิจัย

งานวิจัยนี้ มีผลิตผล ดังต่อไปนี้

บทความวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่

T. Ratniyomchai, U. Jaithong, T. Kulworawanichpong, "Power line carrier for power telemetering",
World Academy of Science, Engineering and Technology, Volume 80, August 2011,
pp. 613-616.



Power Line Carrier for Power Telemetry

Tossaphol Ratniyomchai, Uthai Jaithong, and Thanatchai Kulworawanichpong

Abstract—This paper presents an application of power line carrier (PLC) for electrical power telemetry. This system has a special capability of transmitting the measured values to a centralized computer via power lines. The PLC modem as a passive high-pass filter is designed for transmitting and receiving information. Its function is to send the information carrier together with transmitted data by superimposing it on the 50 Hz power frequency signal. A microcontroller is employed to function as the main processing of the modem. It is programmed for PLC control and interfacing with other devices. Each power meter, connected via a PLC modem, is assigned with a unique identification number (address) for distinguishing each device from one another.

Keywords—Power telemetry, Power line carrier, High-pass filter, Digital data transmission.

I. INTRODUCTION

POWER line communications basically mean any technology that enables data transfer through power lines. Power line carrier communication is mainly used in electric power applications for telecommunication, tele-protection, tele-metering or some other purposes between electric substations. It is normally applied in high-voltage power transmission systems, e.g. 115 kV, 230 kV, 500 kV, etc [1]. The principle of PLC consists in superimposing a high frequency signal at low energy levels over the 50 Hz electrical signal. This second signal is transmitted via the power infrastructure and can be received and decoded remotely. Therefore, the PLC signal is received by any PLC receiver located on the same electrical network. An integrated coupler at the PLC receiver entry points eliminates low frequency components before the signal is treated.

The communication over a power network is rather old. It was introduced in the 1920s by the energy providers, to establish cheap communication between their plants. The basic idea was to use an existing network for communication and not introduce or establish a new one. Later on this concept was adapted to the control of street lighting [2]. So all street lights could be turned on and off by a central “switch” and the lights only needed a small decoder chip. By using this technique no additional wires were needed to control the lights. In the 1980s the technique was introduced on home products, like Baby phones.

The major advantage of using power line carrier as data

This article is funded by National Research Council of Thailand and Suranaree University of Technology under contract no. SUT7-711-53-12-09

Tossaphol Ratniyomchai, Uthai Jaithong, and Thanatchai Kulworawanichpong were with School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, THAILAND 30000. (e-mail: thanatchai@gmail.com).

transmission medium is that every building or house in most cities is equipped with power lines and connect to a local power grid. The PLC communication uses existing local AC power lines as the data transmission medium to provide data accessibility everywhere there is an AC outlet. This method of data transfer is inexpensive and easier than running new signal wires for this communication purpose. With this technology, broadband over power line carrier [3-4] or remotely power telemetry through PLC [5] in power systems is enabled.

In this paper, exploitation of power line carrier technology is described. The application of online power telemetry is emphasized by transmitting measured data through electrical power circuits between a transmitter and receiver located in the same electrical circuit. A design for a PLC modem is illustrated. In the next section, Section 2, a brief review of online power telemetry is addressed. Section 3 describes a design of power line carrier modems. A coupler circuit of band-pass filters is detailed.

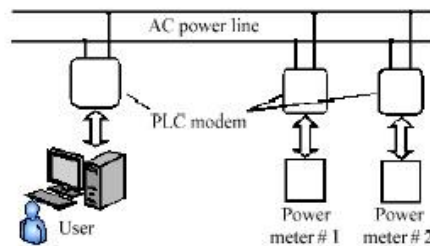


Fig. 1 Online power metering

II. ONLINE POWER METERING

An online metering is an online energy monitoring system to collect meter data via some communication channels and to process this information and then deliver to display devices [5]. It offers a systematic and automated online approach to managing electrical energy consumption, both at supply points to manage actual costs as well as within the industrial plant itself, particularly where costs and efficiencies need to be monitored for large-scale production lines with a great number of manufacturing procedures and steps are involved or divisions within the organization with separate cost centers must be separately accounted for. The online power metering can be summarized as shown in Fig. 1. The power metering system through power line carrier communication as shown in Fig. 1 illustrates the structure and operation of the data transfer system. Each client power meter sends measured data via a

bandwidth, etc), the coupler circuit components (R, L and C) are calculated.

IV. DIGITAL PULSE FREQUENCY MODULATION

Pulse-frequency modulation (PFM) is a modulation in which the pulse repetition rate is varied in accordance with some characteristic of the modulating signal. Pulse-frequency modulation is analogous to frequency modulation of a carrier wave, in which the instantaneous frequency is a continuous function of the modulating signal. In pulse frequency modulation, the frequency of the pulse train is varied from its default value in accordance with the instantaneous amplitude of the modulating signal at sampling intervals. The amplitude and width of the pulses is kept constant. Fig. 4 gives a description of digital pulse frequency modulation. Also, summary of the DPFM can be depicted as shown in Fig. 5.

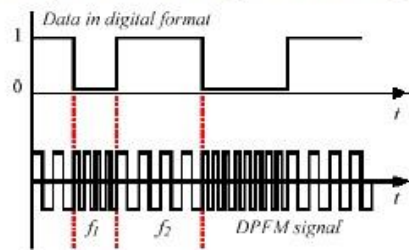


Fig. 4. Digital pulse frequency modulation

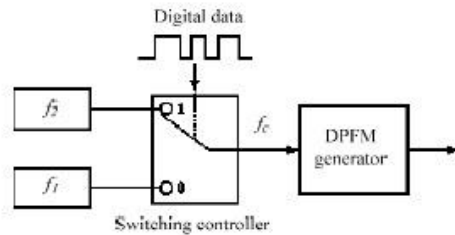


Fig. 5. Procedure of the digital pulse-frequency modulation

Conversely, digital pulse-frequency demodulation is the act of extracting a modulated pulse frequency signal to be converted back to original digital data. The procedure of demodulating the received signal can be shortly summarized as shown in Fig. 6.

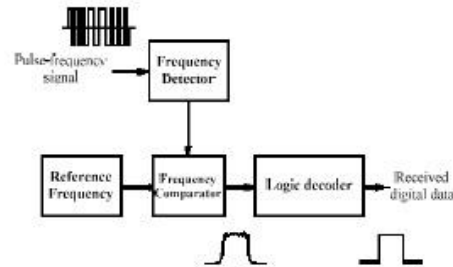


Fig. 6. Procedure of the digital pulse-frequency demodulation

V. PROTOCOL FOR PLC COMMUNICATION

Protocol is a procedure of communication management that is used as a tool to manage the transmission format between the server and its clients attached with power meters as described in Fig. 7. To avoid overlap of data signals, each client modem is assigned with a unique identification number. Communication starts from the server by sending a request to the targeted client in forms of information packet. The data packet contains data type, client ID and CRC (cyclic redundancy check) as shown in Fig. 8. When each client receives the request, the client proceeds checking for matching of the client ID. If the client ID is matched, the client will respond by sending measured data in the specified data type back to the server.

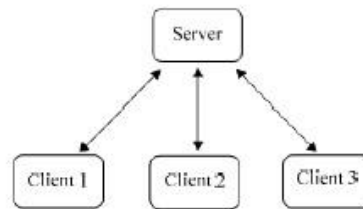


Fig. 7. Procedure of the digital pulse-frequency demodulation

Send Request Packet

N	ID	Data Type	CRC
---	----	-----------	-----

Reply Data Packet

N	ID	Data Type	Data Value	CRC
---	----	-----------	------------	-----

Fig. 8. Data packet

VI. EXPERIMENTS AND RESULTS

In this paper, a power line carrier test system is set for evaluation. The test system consists of a PLC transmitter modem, a PLC receiver modem and power lines. The length of

serial communication channel to be stored in a memory of a client PLC modem. The server PLC modem has a function to control the data transmission sequence classified by each modem identification number and therefore stores those data in its memory. A user can access to data stored in the server PLC modem's memory by using the host computer.

III. DESIGN OF A POWER LINE CARRIER MODEM

Power line communication (PLC) leverages the existing power line infrastructure and provides cost-effective approach for introducing intelligent monitoring and control to many industrial applications. It makes PLC one of the leading enabling technologies for Smart Grid applications ranging from smart metering, lighting control, solar, plug-in electrical vehicle home and building automation of heat and air conditioning, and security. For these applications, implementing a low frequency narrow-band PLC technology provides an optimal fit in terms of bandwidth, power, and cost requirements. Operating in the narrowband domain ensures data integrity while minimizing system cost. Developing an efficient PLC implementation is not without its challenges. Power lines are inherently noisy and require a robust architecture to ensure data reliability. In addition, each application and operating environment is different, requiring developers to optimize designs across a variety of factors. With the many protocol standards and modulation schemes available, developers need a flexible development platform which simplifies design, allows for optimization to environmental conditions, supports local regulations, and can be easily adjusted to conform to evolving standards.

Structure of power line carrier communication is shown in Fig. 2. It consists of i) an interfacing part to external devices (e.g. power meter), ii) a modulating part to modulate data with a carrier, and iii) a coupler circuit to allow modulated information through the AC power line.

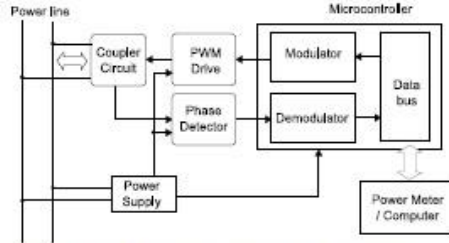


Fig. 2. Simplified diagram of a power line carrier modem

A Power Line Communication Modem system begins with a modulated signal entering the receiver stage, or active band pass filter. It needs to connect to the input of an Analog to Digital Converter fast and accurate enough to properly convert to a digital form for processing. Processed signals are injected back into the power grid by the PLC transmitter stage that

drives a high output current. The transmitter stage must be carefully designed to take digital signals from the microcontroller unit, filter them to eliminate out of band emissions and drive the low impedance of the AC power line.

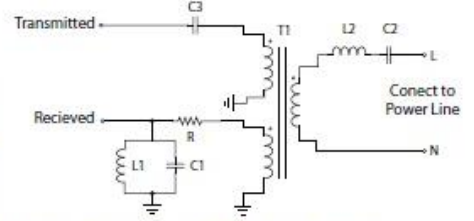


Fig. 3. Coupler circuit of a power line carrier modem

The circuit as shown in Fig. 3 consists of a band-pass filter for transmitting and receiving data between the PLC modem and the AC power line. The band-pass filter is to prevent low frequency components for passing through the PLC side circuit while allowing high-frequency modulated signal transfer between both sides. The design of the band-pass filter requires knowledge of series and parallel resonant circuits [4]. In such circuits, the frequency that causes the sharp peak (resonant peak) is called the resonant frequency (f_0). Briefly, some key characteristics of the proposed resonant circuit are expressed as follows.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

$$BW = \frac{f_0}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2)$$

$$Q = \frac{f_0}{BW} \quad (3)$$

$$f_0 = \sqrt{f_{c1} \times f_{c2}} \quad (4)$$

$$f_{c1} = \sqrt{\frac{BW^2}{4} + f_0^2} - \left(\frac{BW}{2}\right) \quad (5)$$

$$f_{c2} = f_{c1} - BW \quad (6)$$

Where

Q is the quality factor

BW is the bandwidth

f_{c1} is the lower corner frequency

f_{c2} is the upper corner frequency

By using (1) - (6), as long as some characteristics of the resonant circuit are specified (e.g. resonant frequency,

the power line used is 100 m. The test was repeated with a large number of trials, say 10000. The signal to noise ratio and the signal attenuation were evaluated and discussed.

Test of signal quality which is transmitted through power lines is based on evaluation of a ratio between the signal and noises as signal to noise ratio (SNR) and signal attenuation caused by power losses due to power line media. The value of SNR is derived from demodulation of the receiver. This can be achieved by using the calculation as given in the following formula.

$$SNR_{dB} = 20 \log \left(\frac{A_{signal}}{A_{noise}} \right) \text{ dB} \quad (7)$$

Where

A_{signal} is the amplitude of data signal (RMS)

A_{noise} is the amplitude of noises (RMS)

In addition, the signal attenuation (SA) can be calculated by using (8).

$$SA = 10 \log \left(\frac{P_i}{P_o} \right) \text{ dB} \quad (8)$$

Where

P_i is the signal power at the transmitter

P_o is the signal power at the receiver

The test of signal quality was performed by varying the power line length from 0 – 100 m. At each particular length, 10000 trials of signal transfer were carried out. The SA and SNR were therefore calculated as shown in Table I.

TABLE I
TEST OF SIGNAL TO NOISE RATIO

Line length (m)	SA (dB)	SNR (dB)
5	0.44	23.2
20	0.64	22.5
40	1.02	20.6
60	1.16	20.1
80	2.68	19.5
100	3.51	19.2

The results of the signal quality test by assessing the SNR and SA of the signal at some distances as described in Table 1 revealed that when the line length is increased, the SNR is reduced. The higher the SNR is, the better, as there is less background noise. Longer lines are more sensitive to noise and therefore the quality of the data signal is down.

In addition, data transfer error of the PLC test system is determined. From a data packet, the last portion is CRC which is used for checking the data transfer error. The value of CRC is governed by a polynomial of $x^8 + x^2 + x + 1$. The value of

CRC was randomly created and then was included to a data packet to be transferred.

TABLE II
TEST OF CYCLIC REDUNDANCY CHECK

Line length (m)	Number of data transfer error	
	Data comparison	Examining by CRC
5	0	0
20	1	1
40	1	1
60	3	3
80	5	5
100	6	6

From Table II, the data transfer error was increased by the increased line length. This matched with the SNR as reduced by transmission distance. By using the CRC, the data transfer error can be determined.

VII. CONCLUSION

In this paper, a power line carrier communication for power telemetering is presented. The test of signal transmission quality was carried out by a measure of SNR (signal to noise ratio) and SA (signal attenuation) in which the line length of power lines was varied, up to 100 m. The maximum SA and the minimum SNR are 3.51 dB and 19.2 dB, respectively. The test also showed that CRC (cyclic redundancy checking) can be used for evaluation of data transfer error.

REFERENCES

- [1] T. Tran-Anh, P. Auriol and T. Tran-Quoc, "Distribution network modeling for Power Line Communication applications", IEEE Trans. On Power Delivery, pp. 361 – 365, 2005
- [2] G.B. Maizonave, D. Reis and F.S. Lima, "Integrated System for Intelligent Street Lighting", in Proc. Inst. Elect., IEEE Int. Sym. Power-line Comm, vol. 2, pp. 721 – 726, Montreal, Que. 9 -13 July 2006.
- [3] R. Tongia, "Can broadband over powerline carrier (PLC) compete? A techno-economic analysis", Telecommunication Policy, Vol. 28, pp. 559 – 578, 2004
- [4] W. Liu, H. Widmer and P. Raffin "Broadband PLC Access Systems and Field Deployment in European Power Line Networks", IEEE Communications Magazine, pp. 114-118, May, 2003.
- [5] J.V. Wijayakulasooriya, "Remotely Accessible Single Phase Energy Measuring System", in Proc. 1st Int. Conf. and Info Syst, ICIS 2006, pp.304-309, Peradeniya, 8-11 Aug 2006.
- [6] F. Pacheco, M. Lobashov, M. Pinho and G. Prati, "A power line communication stack for metering, SCADA and large-scale domestic applications", Int. Symp. Power Line Communications and its Applications, 6-8 April 2005, pp. 61 – 65