

การสื่อสารด้วยสัญญาณพัลส์ผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลังเพื่อเฝ้าสังเกตสมรรถนะแผงเซลล์แสงอาทิตย์
ที่ต่อกันแบบอนุกรม



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

POWER LINE PULSE COMMUNICATION FOR PERFORMANCE MONITORING OF
SERIES CONNECTED SOLAR PANELS

Mr. Pairote Sirinamaratana



A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy Program in Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2014
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การสื่อสารด้วยสัญญาณพัลส์ผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลังเพื่อ
เฝ้าสังเกตสมรรถนะแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อกันแบบ
อนุกรม

โดย

นายไพโรจน์ ศิรินามารัตนะ

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. เอกชัย ลีลารัมย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาตรีบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. เอกชัย ลีลารัมย์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันเฉลิม โปรา)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรีย์ พุ่มรินทร์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. นิพนธ์ เจ็ดศิริ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร. อภิศักดิ์ วรพิเชฐ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิตรเกษม งามนิล)

ไพโรจน์ ศิรินามารัตนะ : การสื่อสารด้วยสัญญาณพัลส์ผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลังเพื่อเฝ้าสังเกตสมรรถนะแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อกันแบบอนุกรม (POWER LINE PULSE COMMUNICATION FOR PERFORMANCE MONITORING OF SERIES CONNECTED SOLAR PANELS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. เอกชัย ลีลารัมย์, 90 หน้า.

สำหรับในประเทศที่แรงงานมีราคาสูง หรือการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในจุดที่ยากจะเข้าถึง อาทิเช่น บนหลังคา หรือผนังด้านนอกอาคาร ระบบตรวจวัดแบบละเอียดไปถึงระดับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทุกๆแผงเพื่อช่วยหาจุดเสียแบบอัตโนมัติจึงเริ่มเข้ามามีบทบาท ซึ่งส่วนใหญ่แล้วแผงเซลล์แสงอาทิตย์เหล่านี้จะถูกนำมาต่อกันแบบอนุกรมเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าสูงขึ้น ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงใคร่ขอแนะนำเสนอเทคนิควิธีตลอดจนวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อเฝ้าสังเกตสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อกันแบบอนุกรมผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลัง โดยใช้การสื่อสารแบบพัลส์ขนาดใหญ่ โดยวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนของระบบตรวจวัดและไม่สูญเสียพลังงานเมื่อไม่มีการตรวจวัด ในเบื้องต้นได้มีการศึกษาระบบที่มีอยู่เดิมจากทั้งทางบทความทางวิชาการและสิทธิบัตร และใช้การคำนวณความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อคำนวณความน่าเชื่อถือของระบบตรวจวัดแบบต่างๆ ตามมาด้วยการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าและสร้างวงจรจำลองของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อนำมาช่วยในการจำลองการทำงานการสื่อสารผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลังทั้งแบบใช้คลื่นพาหะและแบบสัญญาณพัลส์ให้มีความสมจริงมากยิ่งขึ้น รวมไปถึงการทดลองการรับส่งข้อมูลด้วยสัญญาณพัลส์ขนาดใหญ่ผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลังบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อกันแบบอนุกรมภายใต้สภาพแสงแดดแรงและแสงแดดอ่อน อีกทั้งยังนำเสนอการปรับปรุงระบบการตรวจวัดคุณภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งใช้การสื่อสารด้วยพัลส์โดยคำนึงถึงการใช้งานจริง พร้อมทั้งได้จำลองการทำงานระบบที่นำเสนออีกด้วย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2557

5371803021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: PHOTOVOLTAIC, PULSE, POWER LINE COMMUNICATION

PAIROTE SIRINAMARATANA: POWER LINE PULSE COMMUNICATION FOR PERFORMANCE MONITORING OF SERIES CONNECTED SOLAR PANELS. ADVISOR: ASSOC. PROF. DR. EKACHAI LEELARASMEE, 90 pp.

For high labor cost country or hard to reach location such as Building Integrated Photovoltaic power plant (BIPV), an automatic monitoring system through each photovoltaic (PV) panel is very helpful to determine fault locations. This thesis proposes a novel technique, including with its electronic circuits, to monitor each PV panel performance through a series connected PV panel string by using large pulse communication technique. Objective of the design is to achieve lower monitoring circuit cost and zero power standby. The thesis describes existing PV monitoring systems on both academic papers and patents. Then, an electronic reliability prediction is used to estimate reliability of these systems. Before our circuit design, electrical parameters of an amorphous silicon PV panel is measured and modeled as electronic circuits to make circuit simulation results closer to real situation. Transmitting carries frequency and large pulse communication through a PV string are simulated and analyzed. The chosen technique, large pulse communication, is tested on a PV string under strong and weak sunlight conditions. Finally, the pulse communication is modified to meet practical usages; and its simulation result is also provided.

Department: Electrical Engineering Student's Signature

Field of Study: Electrical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (RES5605 30056-EN) สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัย ขอขอบพระคุณ บริษัท บางกอกโซล่า สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Amorphous silicon ขนาด 50 วัตต์จำนวน 8 แผง ขอขอบพระคุณ บริษัท ซิลิคอน คราฟท์ เทคโนโลยี สำหรับเวลาทำงานบางส่วนเพื่อให้ข้าพเจ้าได้มีโอกาสศึกษาต่อในระดับดุษฎีบัณฑิตนี้ รวมไปถึงเครื่องมือวัดต่างๆอีกด้วย

ขอขอบพระคุณ บิดามารดา และพี่ ป้า น้า อา ที่ช่วยแบ่งเบาภาระทางบ้านในหลายๆ ด้าน และที่ขาดเสียมิได้ก็คือท่าน รศ.ดร.เอกชัย ลีลารัมย์ ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาของข้าพเจ้า ท่านคอยแนะนำทั้งในเรื่องการเขียนและสถานที่ส่งบทความทางวิชาการ ซึ่งเป็นปัญหาหลักของข้าพเจ้าให้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ	1
สารบัญตาราง.....	5
บทที่ 1 บทนำ	6
1.1 แนวเหตุผลในการทำวิทยานิพนธ์.....	6
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	8
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	8
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	9
1.5 วิธีดำเนินงานวิจัย	9
1.6 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลงานวิจัย.....	9
บทที่ 2 ปรีทัศน์วรรณกรรมของระบบตรวจวัดคุณภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	10
2.1 ตัวอย่างระบบตรวจวัดแบบเพิ่มสายสัญญาณขึ้นเพื่อใช้ในการสื่อสาร	10
2.2 ตัวอย่างระบบตรวจวัดแบบที่ใช้ระบบสื่อสารไร้สาย	12
2.3 ตัวอย่างตัวตรวจวัดแบบใช้สายส่งไฟฟ้ากำลังที่มีอยู่เดิมเพื่อการสื่อสาร	14
บทที่ 3 การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของระบบ	17
3.1 หลักการพื้นฐานของการคำนวณความน่าเชื่อถือของระบบ.....	17
3.2 การประมาณโอกาสเสียของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.....	18
3.3 การประมาณโอกาสเสียของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	20
3.4 การประมาณโอกาสเสียของระบบตรวจวัดตัวอย่างที่ 1 ในหัวข้อ 2.1.....	22

3.5 การประมาณโอกาสเสียของระบบตรวจวัดตัวอย่างที่ 2 ในหัวข้อ 2.2.....	24
บทที่ 4 ลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	26
บทที่ 5 การสื่อสารผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลังด้วยวิธีส่งผ่านคลื่นความถี่พาหะทะลุผ่านแผงเซลล์ แสงอาทิตย์.....	31
5.1 หลักการเบื้องต้นของการส่งผ่านคลื่นความถี่พาหะทะลุผ่านแผงเซลล์แสงอาทิตย์	31
5.2 วงจรและการจำลองการทำงาน.....	32
5.3 วิเคราะห์สัญญาณรบกวนจากตัวแปลงแรงดันไฟฟ้าแบบสวิตซ์ซิ่ง	35
บทที่ 6 การสื่อสารผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลังด้วยสัญญาณพัลส์บนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อกันแบบ อนุกรม	40
6.1 หลักการเบื้องต้น.....	40
6.2 ความไม่อุดมคติของสัญญาณพัลส์	41
6.3 วิธีแก้การสั้นของสัญญาณพัลส์ด้วยการใส่โหลดที่ปลายสายส่ง	46
6.4 วิธีแก้การสั้นของสัญญาณพัลส์ด้วยวงจรสวิตซ์แบบเปิดซ้ำ	46
6.5 ผลการทดลองสร้างสัญญาณพัลส์.....	50
6.6 สรุปข้อดีและข้อเสียระหว่างการสื่อสารด้วยคลื่นความถี่พาหะและการสื่อสารด้วยพัลส์..	51
บทที่ 7 การวิเคราะห์เสถียรภาพพวงจรสวิตซ์แบบเปิดซ้ำ	53
บทที่ 8 วงจรและการทดสอบ การสื่อสารผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลังด้วยสัญญาณพัลส์	59
8.1 วงจรของตัวตรวจวัด (Monitoring unit, MU).....	59
8.2 วงจรรับสัญญาณพัลส์.....	61
8.3 วงจรควบคุมแรงดันไฟเลี้ยง.....	63
8.4 วงจรเชื่อมต่อกับกราวด์.....	64
8.5 วงจรสวิตซ์สำหรับสร้างพัลส์.....	65
8.6 ผลการทดลอง.....	67
8.7 ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการใช้งานจริง.....	68

บทที่ 9 การปรับปรุงโครงสร้างของระบบตรวจวัดซึ่งใช้การสื่อสารผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลัง ด้วยสัญญาณพัลส์	69
9.1 หลักการเบื้องต้นของการสื่อสารด้วยพัลส์ผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลังแบบปรับปรุง	69
9.2 วงจรรับ-ส่งสัญญาณพัลส์แบบอนุกรม	70
9.3 ผลการจำลองการทำงาน	74
9.4 การคำนวณโอกาสเสียการตัวตรวจวัด	78
บทที่ 10 บทสรุป	80
10.1 บทสรุปที่ได้รับจากบทความวิจัย	80
10.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย	80
10.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยขั้นต่อไป	80
รายการอ้างอิง	82
ภาคผนวก ก ตัวอย่างโปรแกรม MATLAB สำหรับทำ curve fitting เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ I_{pH} , $I_{o,n}$, R , r_s	88
ภาคผนวก ข ตัวอย่างโปรแกรม MATLAB สำหรับคำนวณค่า Eigenvalue ของวงจรสวิตช์แบบเปิดซ้ำ	89
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	90

สารบัญภาพ

รูปที่ 1.1	โครงสร้างระบบผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบ Multi-string [1].....	6
รูปที่ 1.2	โครงสร้างอย่างง่ายของระบบตรวจวัดแบบละเอียดไปถึงระดับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทุกแผง	7
รูปที่ 2.1	ตัวอย่างระบบตรวจวัดแบบเพิ่มสายสัญญาณขึ้นเพื่อใช้ในการสื่อสาร [4].....	10
รูปที่ 2.2	ตัวอย่างการทำงานของตัวตรวจวัดจากเอกสารอ้างอิงที่ [4].....	11
รูปที่ 2.3	ตัวอย่างระบบตรวจวัดแบบที่ใช้ระบบสื่อสารไร้สาย [10]	12
รูปที่ 2.4	โครงสร้างอย่างง่ายของตรวจวัดจากเอกสารอ้างอิงที่ [9].....	13
รูปที่ 2.5	การวัดรูปแบบต่างๆของตรวจวัดจากเอกสารอ้างอิงที่ [9].....	13
รูปที่ 2.6	ตัวอย่างตัวตรวจวัดแบบใช้สายส่งไฟฟ้ากำลังที่มีอยู่เดิมเพื่อการสื่อสาร [13]	14
รูปที่ 2.7	โครงสร้างอย่างง่ายของระบบจากเอกสารอ้างอิงที่ [12].....	15
รูปที่ 2.8	หลักการส่งข้อมูลผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลังที่มีอยู่เดิมด้วยการเข้ารหัสแบบ CDMA [11].....	15
รูปที่ 3.1	ระบบที่ทำงานต่อเนื่องกัน และระบบที่ทำงานเดียวกันแบบขนาน	17
รูปที่ 3.2	เส้นทางสัญญาณระหว่างตัวตรวจวัดตัวที่ n และตัวควบคุมหลัก ของระบบตรวจวัด ตัวอย่างในหัวข้อที่ 2.1	23
รูปที่ 3.3	ระบบตรวจวัดตัวอย่างที่ 2 ในหัวข้อที่ 2.2	24
รูปที่ 4.1 (ก)	วงจรจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์อย่างง่าย (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Amorphous silicon ขนาด 40 วัตต์.....	26
รูปที่ 4.2	วงจรทดลองที่ใช้วัดค่าความจุของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเครื่อง VNA2180	28
รูปที่ 4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุทางไฟฟ้าและแรงดันคร่อมแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	29
รูปที่ 4.4	การทดลองซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในช่วงความถี่ 1kHz – 10MHz	29
รูปที่ 5.1	หลักการส่งผ่านสัญญาณคลื่นพาหะ (f_0) ทะลุผ่านแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	31
รูปที่ 5.2	วงจรสื่อสาร Communication Circuit (CC)	32

รูปที่ 5.3 วงจรสมมูลของวงจรสื่อสารในโหมดส่งสัญญาณ	32
รูปที่ 5.4 วงจรสื่อสารในโหมดรับสัญญาณ	33
รูปที่ 5.5 ผลการจำลองการทำงานของวงจรสื่อสารด้วยคลื่นความถี่พาหะ บนแผงเซลล์ แสงอาทิตย์ 8 แผง ($n=8$).....	34
รูปที่ 5.6 ผลการจำลองการทำงานวิธีสุ่มค่าอุปกรณ์แบบ Monte Carlo [35].....	35
รูปที่ 5.7 วงจรอย่างง่ายสำหรับประมาณขนาดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการสวิตซ์ซิ่ง ของตัว แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	36
รูปที่ 5.8 สัญญาณสี่เหลี่ยม (rectangular pulse train) ที่โหนด V_{SW}	36
รูปที่ 5.9 ฟังก์ชันถ่ายโอน, $H_n(s)$, จาก V_{sw} ไปยัง $V_{rx}(n)$ ของวงจรสื่อสารทุกๆตัว	37
รูปที่ 5.10 ขนาดของ V_{RX} noise ที่แอมพลิจูดของสัญญาณสวิตซ์ซิ่ง $A = 1000$ โวลต์	38
รูปที่ 5.11 วงจรสื่อสารและวงจรกรองผ่านความถี่สูงที่ภาครับสัญญาณ V_{RX}	38
รูปที่ 6.1 การสื่อสารผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลังด้วยสัญญาณพัลส์บนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ต่อกัน แบบอนุกรม.....	40
รูปที่ 6.2 สัญญาณพัลส์แบบอุดมคติของการสื่อสารผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลังด้วยสัญญาณพัลส์ บน แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อกันแบบอนุกรม	40
รูปที่ 6.3 การส่งพัลส์บนสายส่งไฟฟ้ากำลังที่มีความยาว TL_1, TL_2	41
รูปที่ 6.4 ผลการจำลองการทำงานเพื่อศึกษาความไม่อุดมคติของพัลส์บนสายส่งไฟฟ้ากำลัง ที่มี ความยาว.....	41
รูปที่ 6.5 แบบจำลองอย่างง่ายของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อหาความซ้ำของสัญญาณพัลส์ ที่ ขอบขาขึ้น	43
รูปที่ 6.6 วงจรอย่างง่ายของรูปที่ 6.3(ก) เพื่อศึกษาปรากฏการณ์สั้นที่ความถี่สูง	43
รูปที่ 6.7 ผลการจำลองการทำงานของสัญญาณพัลส์ที่สร้างจากตัว DCU (ก) กรณีที่แบบจำลอง ไม่มี TL_1, TL_2 และ L_5 ในวงจรจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (ข) กรณีที่แบบจำลองมี TL_1, TL_2 และ L_5 ในวงจรจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (ค) เหมือนกรณี (ข) และสัญญาณพัลส์ที่สร้างจาก ตัว DCU ใช้วงจรสวิตซ์แบบเปิดขา.....	44

รูปที่ 6.8 ผลการจำลองการทำงานของสัญญาณของสัญญาณพัลส์ที่สร้างจากตัว DCU ในกรณีที่แบบจำลองมี TL1, TL2 และ L_S ในวงจรจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์	45
รูปที่ 6.9 รูปแสดงกลไกการของการเกิดพัลส์คร่อมตัว DCU ในรูปที่ 6.8.....	45
รูปที่ 6.10 (ก) สัญญาณสี่เหลี่ยม (pulse) (ข) สัญญาณสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal pulse) ซึ่งมีขอบเขตสเปกตรัม [41] (spectral bounds) ดังรูปที่ 6.11 (ก) และ (ข) ตามลำดับ	47
รูปที่ 6.11 ขอบเขตสเปกตรัม [41] (spectral bounds) ของ (ก) สัญญาณสี่เหลี่ยม (ข) สัญญาณสี่เหลี่ยมคางหมู.....	47
รูปที่ 6.12 วงจรสวิตช์ที่เปิดอย่างช้าๆ เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ที่มีขอบขาลงช้า	48
รูปที่ 6.13 ผลการจำลองการทำงานของวงจรสวิตช์รูปที่ 6.12.....	48
รูปที่ 6.14 แสดงตำแหน่งของ R_C หรือ R_G แก่การสั้นของวงจรสวิตช์ที่เปิดอย่างช้าๆ	50
รูปที่ 6.15 สัญญาณพัลส์จริง คร่อมตัวรวบรวมข้อมูล (DCU) แบบต่างๆเมื่อสัญญาณพัลส์ ถูกสร้างจากตัวตรวจวัดบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์อันหนึ่ง	50
รูปที่ 6.16 สัญญาณพัลส์จริงคร่อมตัวรวบรวมข้อมูล (DCU) แบบต่างๆ เมื่อสัญญาณพัลส์ถูกสร้างจากสวิตช์บนตัว DCU เอง.....	51
รูปที่ 7.1 วงจรสวิตช์แบบเปิดช้าจากหัวข้อที่ 6.4.....	55
รูปที่ 7.2 วงจรสมมูลเชิงเส้นของสวิตช์แบบเปิดช้า	56
รูปที่ 7.3 ค่า Eigenvalue, α (แกนนอน) และ f (แกนตั้ง) ของวงจรสวิตช์แบบเปิดช้า บนตัวตรวจวัด (Monitoring Unit, MU).....	58
รูปที่ 7.4 ค่า Eigenvalue, α (แกนนอน) และ f (แกนตั้ง) ของวงจรสวิตช์แบบเปิดช้า บนตัวรวบรวมข้อมูล (Data Collector Unit, DCU)	58
รูปที่ 8.1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งต่อกันแบบอนุกรม	59
รูปที่ 8.2 วงจรส่วนต่างๆภายในตัวตรวจวัด (Monitoring unit, MU)	60
รูปที่ 8.3 แรงดันที่โหนด gnd และ PV+ (เทียบ PV-) จากการทดลองจริง บนวงจรตัวตรวจวัดดังรูปที่ 8.2.....	61
รูปที่ 8.4 วงจรรับสัญญาณพัลส์ และสัญญาณพัลส์.....	62

รูปที่ 8.5 วงจรควบคุมแรงดันไฟเลี้ยงแบบเชิงเส้น และของตัวถังของทรานซิสเตอร์ Q_{C1} แบบ ต่างๆ.....	63
รูปที่ 8.6 วงจรเชื่อมต่อกรรวด.....	65
รูปที่ 8.7 วงจรสวิตช์สำหรับสร้างพัลส์.....	65
รูปที่ 8.8 ผลการจำลองการทำงานของวงจรสวิตช์สำหรับสร้างพัลส์รูปที่ 8.7(ก).....	66
รูปที่ 8.9 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด amorphous silicon ขนาด 50 วัตต์สำหรับใช้ทดลอง	67
รูปที่ 8.10 สัญญาณพัลส์คร่อมตัวรวบรวมข้อมูล (ก) ภายใต้แสงแดดจ้า (ข) ภายใต้แสงแดด อ่อน	67
รูปที่ 8.11 ผลการวัดแรงดันที่โหนด gnd และ PV+ (เทียบ PV-) บนวงจรตัวตรวจวัดดังรูปที่ 8.2	68
รูปที่ 9.1 โครงสร้างตัวตรวจวัดคุณภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งใช้การสื่อสาร แบบพัลส์แบบ ปรับปรุง	69
รูปที่ 9.2 วงจรอย่างง่ายเพื่อประกอบคำอธิบายการส่งสัญญาณพัลส์แบบอนุกรม	71
รูปที่ 9.3 สัญญาณในวงจรอย่างง่ายรูปที่ 9.2.....	72
รูปที่ 9.4 วงจรรับ-ส่งสัญญาณพัลส์ ทั้งขาขึ้นและขาลง.....	73
รูปที่ 9.5 วงจรอย่างง่ายเพื่อประกอบการอธิบายผลการจำลองการทำงาน	74
รูปที่ 9.6 ผลการจำลองการทำงานการส่งพัลส์แบบขาขึ้น.....	75
รูปที่ 9.7 ผลการจำลองการทำงานการส่งพัลส์แบบขาขึ้น.....	75
รูปที่ 9.8 ผลการจำลองการทำงานการส่งพัลส์แบบขาลง.....	76
รูปที่ 9.9 ผลการจำลองการทำงานการส่งพัลส์แบบขาลง.....	76
รูปที่ 9.10 ผลการจำลองการทำงานการส่งสัญญาณพัลส์ผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลัง จากตัวรวบรวม ข้อมูล (0) และ ตัวตรวจวัดตัวที่ (4), (3), (2), (1) ตามลำดับเวลา.....	77
รูปที่ 9.11 ผลการจำลองการทำงานการส่งสัญญาณพัลส์ผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลัง จากตัวรวบรวม ข้อมูล (0) และ ตัวตรวจวัดตัวที่ (4), (3), (2), (1) ตามลำดับเวลา.....	77



สารบัญตาราง

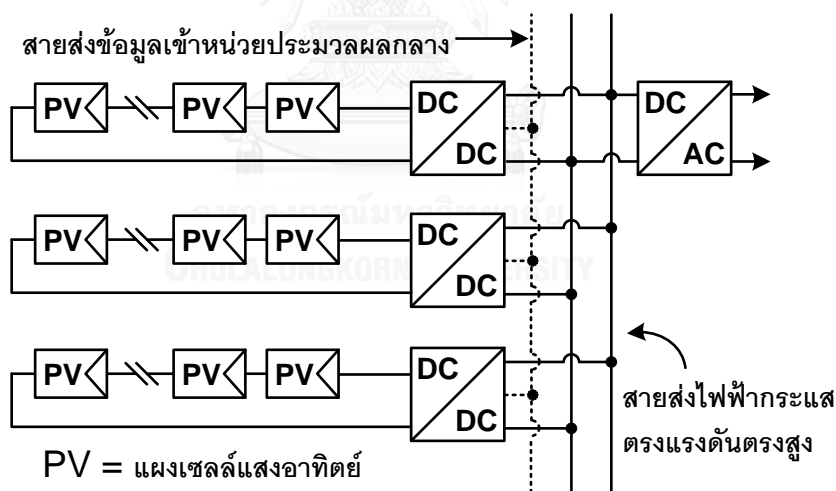
ตารางที่ 3.1 ค่าคงที่ของเวลาขีดข้องเฉลี่ย (MTBF) ของอุปกรณ์ต่างๆที่คำนวณจาก MIL-HDBK-217F [16].....	18
ตารางที่ 3.2 ค่าโอกาสขีดข้องใน 20 ปีของอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งคำนวณด้วยข้อมูลในตารางที่ 3.1 .20	
ตารางที่ 3.3 ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หลังการใช้งานมาแล้ว 20 ปี [18].....	21
ตารางที่ 3.4 ค่า chi square χ^2 - จากเอกสารอ้างอิง [17] บทที่ 8 หน้า 44	21
ตารางที่ 3.5 ค่าโอกาสเสียภายใน 20 ปีของระบบตรวจวัดตัวอย่างในหัวข้อที่ 2.1 ที่ตำแหน่ง n	22
ตารางที่ 3.6 แบบที่เป็นไปได้ทั้งหมดของการวัดแรงดันคร่อมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ n ของระบบตรวจวัดตัวอย่างที่ 2 ในหัวข้อที่ 2.2.....	25
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Amorphous silicon ขนาด 40 วัตต์แผงหนึ่ง.....	27
ตารางที่ 7.1 ความหมายของอักษรย่อในรูป 7.2 และค่าประกอบการคำนวณ Eigenvalue ในรูปที่ 7.3 และ 7.4.....	56
ตารางที่ 8.1 ความต้านทานการถ่ายเทอุณหภูมิ (Thermal resistance) และอุณหภูมิที่จะเกิดขึ้นบนตัวถัง (Case) แบบต่างๆ.....	64
ตารางที่ 9.1 ตารางแสดง ชนิด จำนวน และค่า MTBF ของอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบตัวตรวจวัดรูปที่ 9.1	78

บทที่ 1

บทนำ

1.1 แนวเหตุผลในการทำวิทยานิพนธ์

เนื่องจากการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งยังมีการส่งเสริมจากทางภาครัฐในหลายๆประเทศ จึงทำให้การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานสะอาดนี้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยส่วนใหญ่แล้วระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จะมีโครงสร้างเป็นแบบ Multi-string [1] ดังรูปที่ 1.1 ซึ่งนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาต่ออนุกรมกันตั้งแต่ 8 – 20 แผง แล้วนำไปต่อเข้ากับตัวเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก (DC to DC boost convertor, DC/DC) ซึ่งสามารถหาจุดกระแสและแรงดันที่เหมาะสมที่สุดเพื่อดึงกำลังไฟฟ้า (Maximum power point tracking, MPPT) ออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อกันแบบอนุกรมไปไว้ยังสายส่งที่มีแรงดันสูงขึ้น แล้วจึงนำพลังงานที่ได้จาก DC/DC หลายๆตัวที่ต่อรวมกันแบบขนาน มาแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับด้วยตัวแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับขนาดใหญ่ (DC to AC convertor, DC/AC) จ่ายพลังงานเข้าไปยังสายส่งไฟฟ้าหลักที่มีอยู่เดิม

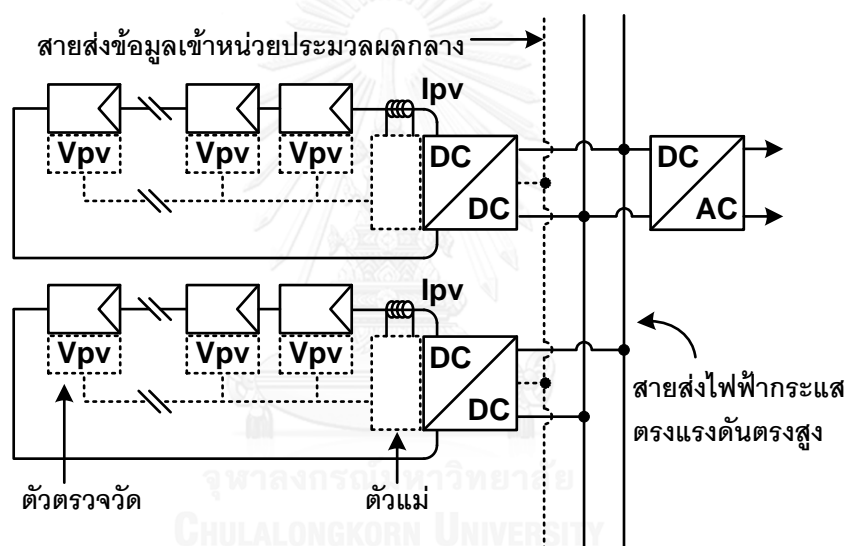


รูปที่ 1.1 โครงสร้างระบบผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบ Multi-string [1]

สำหรับโรงงานไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งมีแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนมาก การบำรุงรักษานั้นจำเป็นต้องมีระบบตรวจวัดประสิทธิภาพแบบอัตโนมัติช่วยเหลือ โดยทั่วไปแล้วที่ตัวเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก (DC/DC) ทุกๆตัวจะมีการวัดพลังงานรวมที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออนุกรมกัน แล้วส่งข้อมูลเข้าสู่หน่วยประมวลผลกลางเพื่อวิเคราะห์ว่าที่ตัวเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กตัวไหนผลิตพลังงานได้น้อยกว่าปกติ จากนั้นจึงค่อยส่งทีมช่างมา

ตรวจหาสาเหตุ [2] โดยการใช้อุปกรณ์ต่างๆ อาทิเช่น มิเตอร์วัดแรงดัน กล้องตรวจจับความร้อน [3] เครื่องวิเคราะห์ทัศนภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (IV curve analyzer) เป็นต้น

การติดตั้งระบบตรวจวัดแบบละเอียดไปถึงระดับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทุกแผงเพื่อช่วยหาจุดเสียอย่างอัตโนมัติเริ่มเข้ามามีบทบาทสำหรับการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในจุดที่ยากจะเข้าถึง อาทิเช่น บนหลังคา หรือผนังด้านนอกอาคาร หรือในประเทศที่แรงงานมีราคาสูง จากการค้นหาข้อมูลเบื้องต้นพบว่าระบบเหล่านี้มีการจดสิทธิบัตรในต่างประเทศอยู่หลายเทคนิควิธีโดยหลักการแล้วการตรวจวัดประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก็คือการวัดความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (IV curve) ดังนั้นระบบทั้งหลายจึงมีตัวตรวจวัดวัดแรงดันไฟฟ้า (V_{pv}) และอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทุกๆแผง ส่วนกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (I_{pv}) อาจจะวัดจุดเดียวที่ตัวแม่ซึ่งติดอยู่กับเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก (DC/DC) ดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 โครงสร้างอย่างง่ายของระบบตรวจวัดแบบละเอียดไปถึงระดับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทุกแผง

วิธีที่ตัวตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ส่งข้อมูลที่วัดได้ไปยังตัวแม่ที่ติดอยู่กับตัวเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก มีหลายรูปแบบอย่างเช่น การเพิ่มสายสัญญาณขึ้นเพื่อเป็นช่องทางสื่อสารการใช้ระบบสื่อสารไร้สาย (Wireless communication network) และ การใช้สายส่งไฟฟ้ากำลังที่มีอยู่แล้วเพื่อสื่อสาร (Power Line Communication, PLC) ดังจะกล่าวต่อไปในบทที่ 2

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอเสนอเทคนิควิธีการรับส่งข้อมูลระหว่างตัวตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับตัวแม่ที่ติดอยู่กับตัวเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก โดยใช้การสื่อสารแบบพัลส์เพื่อลดต้นทุนของระบบตรวจวัด รวมไปถึงการออกแบบตัวตรวจวัดให้ใช้พลังงานน้อยที่สุดเมื่อไม่มีการตรวจวัด

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- ศึกษาความเป็นไปได้ของการสื่อสารผ่านแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อกันแบบอนุกรม ด้วยสายส่งไฟฟ้ากำลังที่มีอยู่เดิม
- พัฒนาระบบการตรวจวัดคุณภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งใช้งานอยู่ อาทิเช่น บนหลังคาอาคาร หรือ ในโรงงานไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยคำนึงถึงการใช้งานจริง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. วัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และสร้างวงจรจำลอง (circuit model) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการสื่อสาร ผ่านแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อกันแบบอนุกรม ด้วยสายส่งไฟฟ้ากำลังที่มีอยู่เดิม
2. เปรียบเทียบ ข้อดี-ข้อเสีย ระหว่างการสื่อสารผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลัง แบบใช้พัลส์ และ แบบใช้คลื่นพาหะ
3. ออกแบบวงจรและทดสอบการสื่อสารด้วยพัลส์ ผ่านแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อกันแบบอนุกรม ด้วยสายส่งไฟฟ้ากำลังที่มีอยู่เดิม โดยมีคุณสมบัติดังนี้
 - ใช้การเข้ารหัสแบบ Binary pulse length coding ที่อัตราเร็วข้อมูลเฉลี่ยอย่างน้อย 2 กิโลบิตต่อวินาที
 - วงจรที่ออกแบบใช้กระแสเฉลี่ยจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์น้อยกว่า 10 mA ในขณะที่ทำงานปกติและน้อยกว่า 100 uA ขณะ standby
 - ทดสอบการทำงานกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์จริงที่ต่อกันแบบอนุกรมอย่างน้อย 4 แผง
4. พัฒนาระบบการตรวจวัดคุณภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้การสื่อสารด้วยพัลส์ และคำนึงถึงการใช้งานจริงดังนี้
 - นำเสนอวิธีลดโอกาสเสียของระบบตรวจวัดที่มีโอกาสเสียโดยประมาณน้อยกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์หรือน้อยกว่า 1% ใน 20 ปี โดยใช้การคำนวณโอกาสเสียด้วยแบบจำลองเอ็กโปเนนเชียล
 - ความสามารถในการหาลำดับ รหัสประจำตัวของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างอัตโนมัติ
 - ความสามารถในการหาจุดขาดของสายส่งพลังงานไฟฟ้า ได้อย่างอัตโนมัติ
5. ออกแบบวงจรและจำลองการทำงานระบบที่นำเสนอในข้อ 4

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้พัฒนาเทคนิควิธีแบบใหม่เพื่อตรวจวัดคุณภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งใช้งานอยู่ อาทิ เช่น บนหลังคาอาคาร หรือ ในโรงงานไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

1.5 วิธีดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาระบบตรวจวัดหรือระบบหาจุดเสียแบบต่างๆจากทั้งทางบทความทางวิชาการและ สิทธิบัตร
2. ศึกษาการคำนวณความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เพื่อคำนวณความน่าเชื่อถือของ ระบบตรวจวัดแบบต่างๆ
3. วัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และสร้างวงจรจำลอง (circuit model) ของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์
4. นำวงจรจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้มาช่วยจำลองการทำงาน เพื่อลดเวลาการออกแบบ วงจรตัวตรวจวัด
5. ทดลองการสื่อสารด้วยสัญญาณพัลส์ผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลังที่มีอยู่เดิม
6. พัฒนาระบบการตรวจวัดคุณภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งใช้การสื่อสารด้วยพัลส์ โดยคำนึงถึง การใช้งานจริงพร้อมทั้งจำลองการทำงานระบบที่นำเสนอ

1.6 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลงานวิจัย

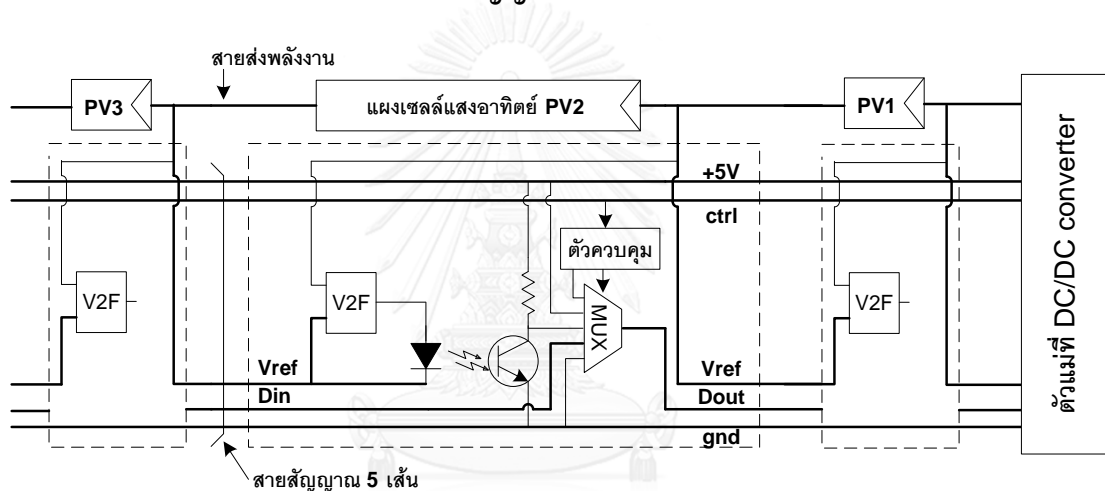
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 10 บท โดยบทที่ 2 จะเริ่มศึกษาระบบตรวจวัดหรือ ระบบหาจุดเสียแบบต่างๆจากทั้งทางบทความทางวิชาการและสิทธิบัตร และศึกษาการคำนวณความ น่าเชื่อถือของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อคำนวณความน่าเชื่อถือของระบบตรวจวัดแบบต่างๆในบทที่ 3 จากนั้นจึงทำการทดลองเพื่อวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และสร้างวงจรจำลอง ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในบทที่ 4 เมื่อได้วงจรจำลองของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แล้วจึงลองออกแบบ วงจรสื่อสารด้วยคลื่นพาหะผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลังที่มีอยู่เดิมในบทที่ 5 ตามด้วยการสื่อสารด้วย สัญญาณพัลส์ผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลังที่มีอยู่เดิมในบทที่ 6 ส่วนบทที่ 7 นั้นเป็นบทเพิ่มเติมเพื่อแก้ปัญหา เสถียรภาพของวงจรในบทที่ 6 ตามมาด้วยรายละเอียดของวงจรต่างๆที่ใช้สร้างตัวตรวจวัดซึ่งใช้การ สื่อสารแบบพัลส์ในบทที่ 8 รวมไปถึงผลการทดลองการส่งสัญญาณพัลส์ผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลังและ ปัญหาในทางปฏิบัติ สำหรับบทที่ 9 ได้นำเสนอการปรับปรุงระบบการตรวจวัดคุณภาพแผงเซลล์ แสงอาทิตย์ซึ่งใช้การสื่อสารด้วยพัลส์ โดยคำนึงถึงการใช้งานจริงพร้อมทั้งจำลองการทำงานระบบที่ นำเสนอ ตามด้วยบทสรุปผลงานวิจัยในบทที่ 10

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมของระบบตรวจวัดคุณภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ในปัจจุบันระบบที่สามารถตรวจวัดแบบละเอียดไปถึงระดับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทุกแผงได้มีการจดสิทธิบัตรในต่างประเทศอยู่หลายรูปแบบ คือ แบบที่เพิ่มสายสัญญาณขึ้นเพื่อใช้ในการสื่อสาร [4, 5] แบบที่ใช้ระบบสื่อสารไร้สาย (wireless communication network) [6-10] และแบบที่ใช้สายส่งไฟฟ้ากำลังที่มีอยู่แล้วเพื่อสื่อสาร (Power Line Communication, PLC) [11-14] วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะขอยกตัวอย่างที่น่าสนใจของแต่ละแบบมานำเสนอ

2.1 ตัวอย่างระบบตรวจวัดแบบเพิ่มสายสัญญาณขึ้นเพื่อใช้ในการสื่อสาร



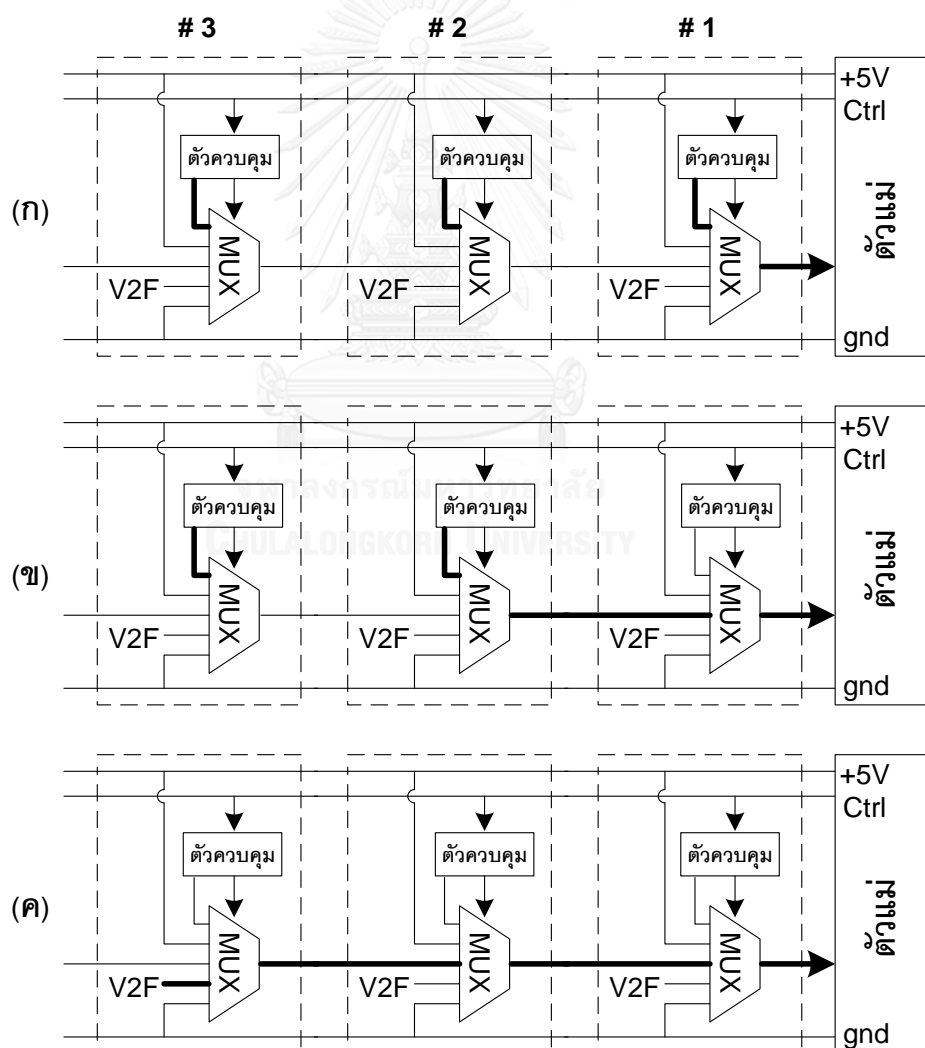
รูปที่ 2.1 ตัวอย่างระบบตรวจวัดแบบเพิ่มสายสัญญาณขึ้นเพื่อใช้ในการสื่อสาร [4]

รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างตัวตรวจวัดแบบหนึ่งซึ่งจดสิทธิบัตรในสหรัฐอเมริกาปี 2009 [4] แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทุกแผงที่ต่ออนุกรมกันจะมีตัวตรวจวัดติดอยู่ทุกแผงตัวตรวจวัดแต่ละตัวใช้ตัวแปลงแรงดันเป็นความถี่ (voltage to frequency converter, V2F) แล้วส่งสัญญาณความถี่ที่ได้นั้นผ่านตัวส่งสัญญาณแสง (Opto - coupler) มาที่ขาเข้าขาหนึ่งของตัวสหสัญญาณ (Multiplexer, MUX) ซึ่งมีตัวควบคุมเลือกสัญญาณขาออกให้ตัวสหสัญญาณระบบนี้มีสายโยงเพิ่มขึ้นอีก 5 เส้น คือ กราวด์ (gnd) ไฟเลี้ยงตัวตรวจวัด (+5V) สายคำสั่งจากตัวแม่ (ctrl) สายข้อมูลเข้าและออก (data in/out) และสาย Vref

สาย Vref เป็นจุดที่น่าสังเกตว่า ขาเข้าตัวแปลงแรงดันเป็นความถี่วัดแรงดันคร่อมขั้วบวกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 2 และ Vref ซึ่งเป็นขั้วบวกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 3 (แทนที่จะเป็นขั้วลบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 2) เพราะว่าถ้าสายส่งพลังงานหรือสายสัญญาณที่ขั้วลบของแผง

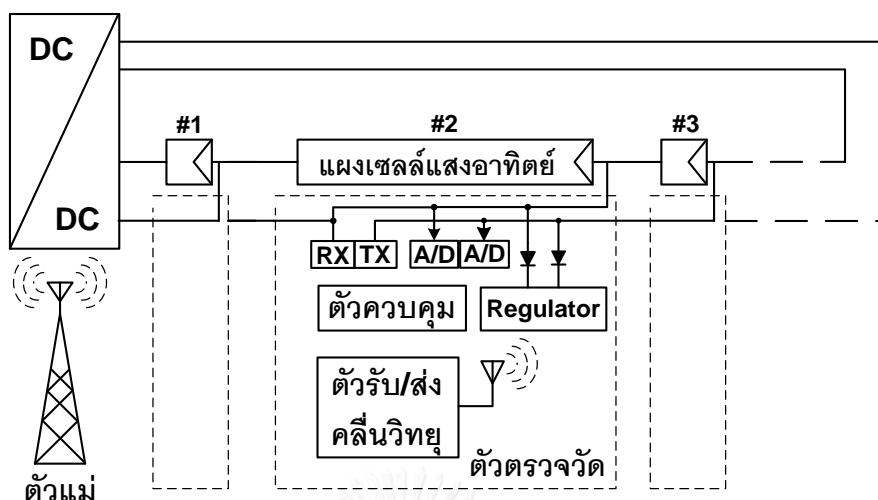
เซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 2 ขาด แรงดันคร่อมขาเข้าของตัวแปลงแรงดันเป็นความถี่จะเป็นศูนย์ (หรือติดลบ) ดังนั้นสาย Vref จึงใช้เพื่อตรวจสอบการเชื่อมต่อของสายส่งพลังงานหรือสายสัญญาณนั่นเอง

ตัวตรวจวัดบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทุกๆตัวจะมีเลขประจำตัว แต่ตอนติดตั้งครั้งแรกตัวแม่จะยังไม่ทราบว่าในระบบของตนมีตัวตรวจวัดเลขประจำตัวอะไรบ้างและเรียงลำดับก่อนหลังอย่างไร ตัวแม่จะส่งคำสั่งให้ทุกๆตัวส่งเลขประจำตัวของตัวเองออกมาและเลขประจำตัวที่ตัวแม่จะรับได้ก็คือตัวแรกที่ติดกับตัวแม่ดังรูปที่ 2.2 (ก) จากนั้นตัวแม่ก็จะบอกให้ตัวแรกส่งผ่านข้อมูลของตัวถัดไปมาดังรูปที่ 2.2 (ข) ตัวแม่ก็จะได้เลขประจำตัวของตัวที่ 2 ทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆจนถึงตัวสุดท้าย และเมื่อตัวแม่ต้องการอ่านความถี่จากตัวแปลงแรงดันเป็นความถี่ของตัวตรวจวัดตัวไหน ก็สั่งให้ตัวตรวจวัดทุกตัวส่งข้อมูลของตัวถัดไปออกมา แล้วระบุเลขประจำตัวให้ตัวตรวจวัดที่ต้องการส่งความถี่ของตัวเองออกมา ดังรูปที่ 2.2 (ค)



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างการทำงานของตัวตรวจวัดจากเอกสารอ้างอิงที่ [4]

2.2 ตัวอย่างระบบตรวจวัดแบบที่ใช้ระบบสื่อสารไร้สาย



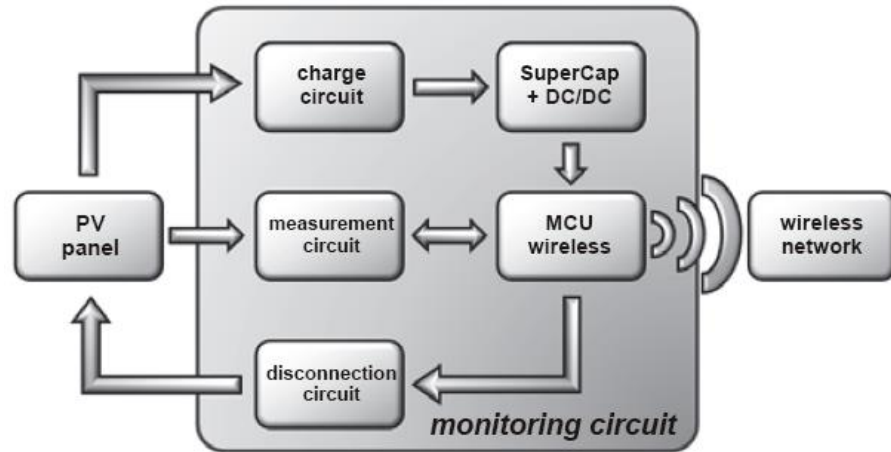
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างระบบตรวจวัดแบบที่ใช้ระบบสื่อสารไร้สาย [10]

2.2.1 จากเอกสารอ้างอิงที่ [10] ซึ่งจดสิทธิบัตรในสหรัฐอเมริกาปี ค.ศ.2006 โครงสร้างตัวตรวจวัดได้ถูกนำมาแสดงไว้ดังรูปที่ 2.3 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทุกแผงที่ต่ออนุกรมกันจะมีตัวตรวจวัดติดอยู่ทุกแผงตัวตรวจวัดใช้ไฟเลี้ยงจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งแปลงลงมาเหลือ 5V ด้วยตัว regulator และวัดแรงดันคร่อมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล (A/D) แล้วส่งไปให้ตัวแม่ด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ระบบนี้มีสายเพิ่มขึ้นมาอีกเพียงแค่ 1 เส้นใช้เพื่อสื่อสารแบบอนุกรมด้วยตัวสื่อสาร Tx และ Rx อีกทั้งยังเป็นทางให้ตัวตรวจวัดสามารถใช้ไฟเลี้ยงและวัดแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตัวถัดไปได้อีกด้วย นอกจากนี้การวัดแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตัวถัดไปยังสามารถใช้ตรวจสอบตำแหน่งการขาดของสายส่งพลังงานหรือสายสัญญาณได้ด้วย หรือก็คือ ถ้าสายส่งพลังงานหรือสายสัญญาณระหว่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์แผงที่ 2 และ 3 ขาด ตัวตรวจวัดตัวที่ 2 จะไม่สามารถวัดแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แผงที่ 3 ได้

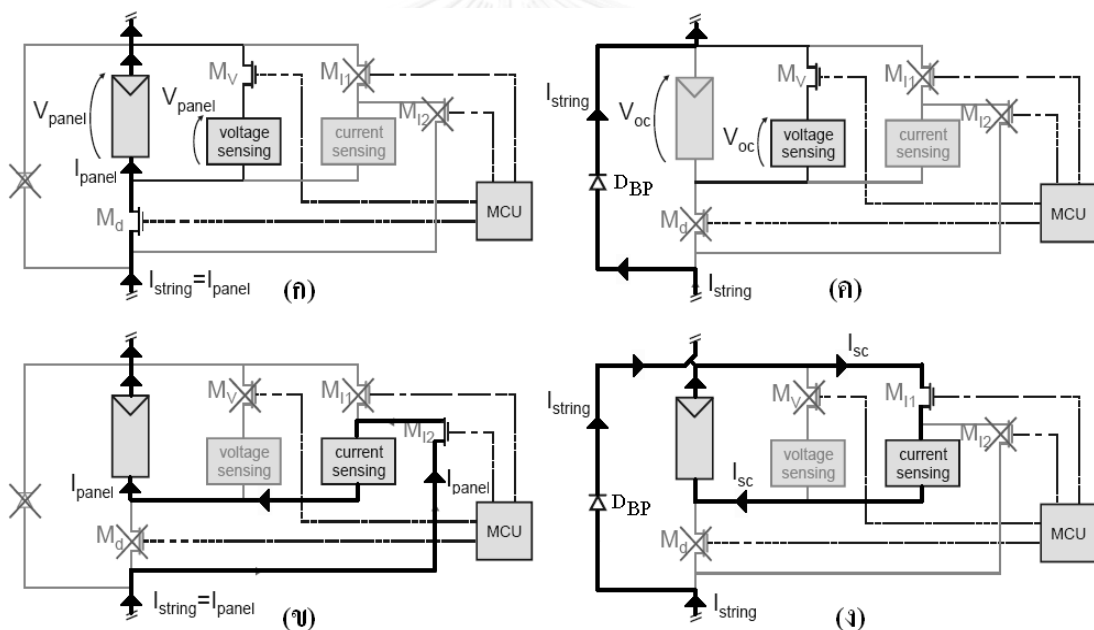
ตัวตรวจวัดบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทุกๆตัวจะมีเลขประจำตัว แต่ตอนติดตั้งครั้งแรกตัวแม่จะยังไม่ทราบว่าในระบบของตนมีตัวตรวจวัดเลขประจำตัวอะไรบ้างและเรียงลำดับก่อนหลังอย่างไร ตัวแม่จะทำการสื่อสารแบบอนุกรมเรียกตัวตรวจวัดตัวที่ 1 ตัวตรวจวัดตัวที่ 1 ก็จะบอกเลขประจำตัวกลับไปผ่านทางคลื่นความถี่วิทยุ แล้วก็ไปเรียกตัวตรวจวัดตัวที่ 2 ให้ส่งเลขประจำตัวไปให้ตัวแม่ ต่อๆกันไปจนครบทั้งหมด

2.2.2 จากบทความทางวิชาการ [9] ซึ่งมีโครงสร้างอย่างง่ายดังรูปที่ 2.4 ตัวตรวจวัดประกอบด้วยวงจรประจุไฟฟ้า (charge circuit) ซึ่งจะนำพลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV panel) มาเก็บสะสมไว้ในตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ (Super Cap) และมีวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรง

(DC/DC) แปลงพลังงานจากตัวเก็บประจุดังกล่าวมาเลี้ยงวงจรส่วนต่างๆ ตัวควบคุม (MCU) จะรับส่งข้อมูลด้วยการสื่อสารไร้สาย (wireless) และควบคุมการวัดทั้ง 4 แบบดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 โครงสร้างอย่างง่ายของตรวจวัดจากเอกสารอ้างอิงที่ [9]



รูปที่ 2.5 การวัดรูปแบบต่างๆของตรวจวัดจากเอกสารอ้างอิงที่ [9]

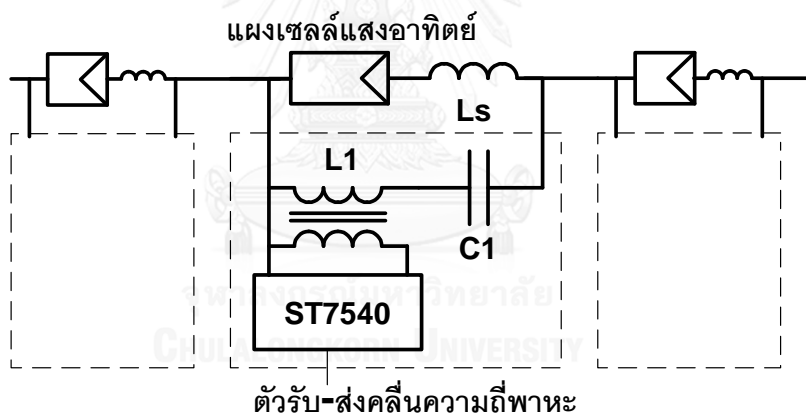
รูปที่ 2.5 (ก) สวิตช์ M_d จะเปิดให้กระแสไหลผ่านปกติโดยวงจรวัดแรงดัน (voltage sensing) จะสามารถวัดแรงดันคร่อมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขณะทำงานปกติ (V_{panel}) นี้ได้ รูปที่ 2.5 (ข) จะให้กระแสไหลผ่านสวิตช์ M_{i2} และวงจรวัดกระแส (current sensing) วัดกระแสขณะทำงานปกติ (I_{panel}) รูปที่ 2.5 (ค) สวิตช์ M_d จะปิดให้กระแส (I_{string}) ไหลผ่านทางไดโอด D_{BP} ซึ่งแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะไม่จ่ายกระแสจึงทำให้สามารถวัด Open circuit voltage (V_{oc}) ได้ รูปที่ 2.5 (ง) สวิตช์ M_d จะปิดให้กระแส (I_{string}) ไหลผ่านทางไดโอด D_{BP} และสวิตช์ M_{i1} จะเปิดลัดวงจรเพื่อวัด Short circuit current

(I_{SC}) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยในโหมดนี้ไฟเลี้ยงวงจรส่วนต่างๆได้มาจากพลังงานที่สะสมไว้ในตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ (Super Cap) ดังกล่าวข้างต้น

2.3 ตัวอย่างตัวตรวจวัดแบบใช้สายส่งไฟฟ้ากำลังที่มีอยู่เดิมเพื่อการสื่อสาร

ระบบตรวจวัดคุณภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบที่สื่อสารผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลังนั้นไม่พบที่เป็นสิทธิบัตร แต่ยังมีบทความทางวิชาการที่เกี่ยวข้องดังนี้

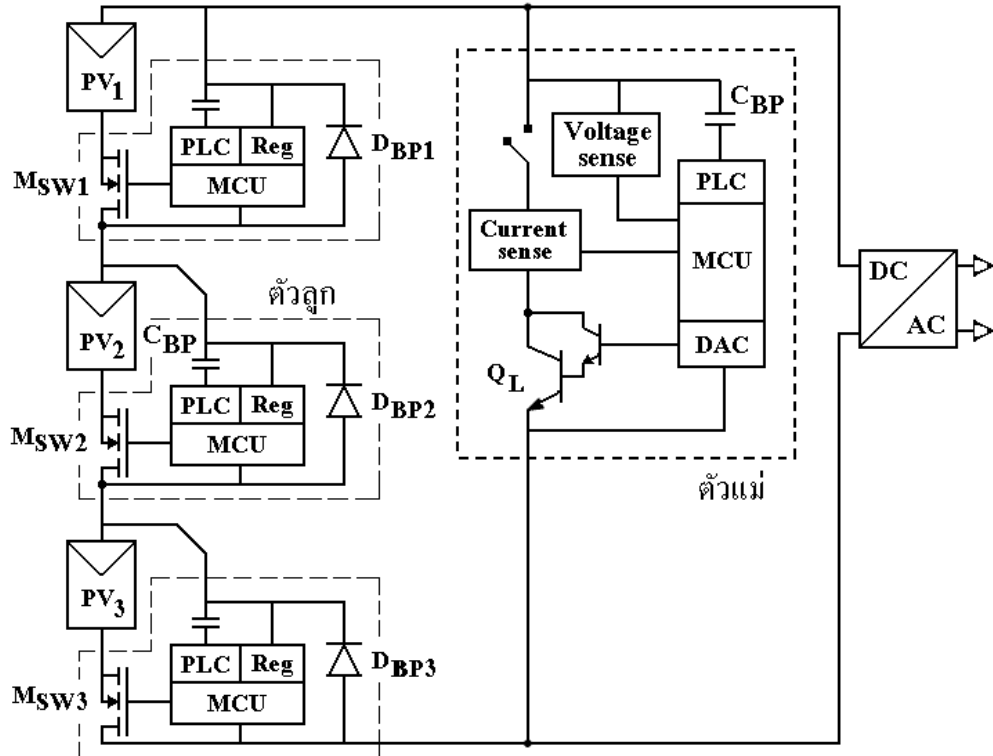
2.3.1 จากบทความทางวิชาการ [13] ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ตัวเก็บประจุ C1 และหม้อแปลง (transformer) L1 เป็นวงจรกรองผ่านสัญญาณคลื่นพาหะความถี่ 132.5 kHz สำหรับตัวเหนี่ยวนำ L_s ที่ต่ออนุกรมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ มีจุดประสงค์หลักเพื่อสร้างวงจรแปลงแรงดันที่สามารถหาจุดกระแสและแรงดันที่เหมาะสมที่สุดเพื่อดึงกำลังไฟฟ้าให้มากที่สุด (Maximum power point tracking algorithm, MPPT) จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งมีใช้จุดประสงค์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงมิได้กล่าวถึง สำหรับจุดประสงค์รองของตัวเหนี่ยวนำ L_s ก็คือเพิ่มค่าต้านทานเชิงซ้อน (impedance) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้สัญญาณคลื่นพาหะมีขนาดแรงดันใหญ่ขึ้น



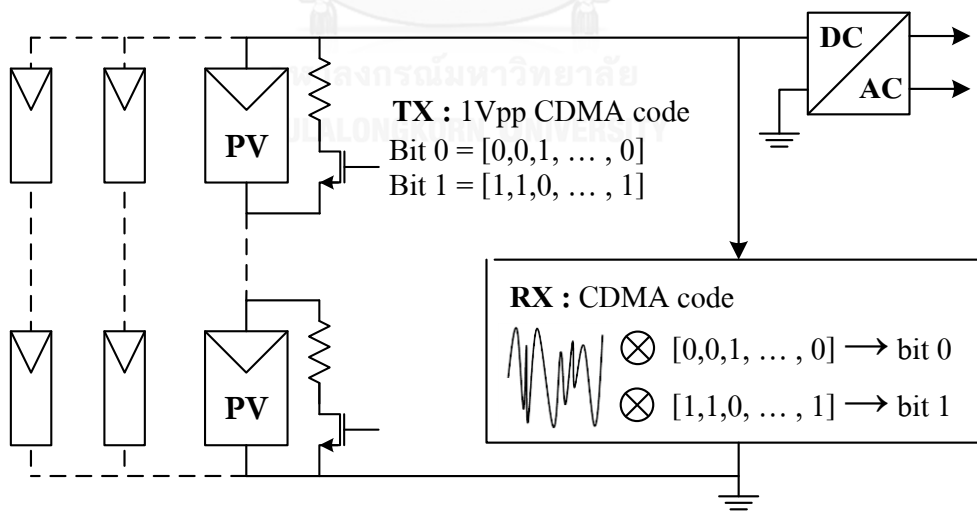
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างตัวตรวจวัดแบบใช้สายส่งไฟฟ้ากำลังที่มีอยู่เดิมเพื่อการสื่อสาร [13]

2.3.2 จากบทความทางวิชาการ [12] ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ตัวรับส่งสัญญาณผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลัง (PLC) เป็นวงจรรวมเบอร์ SIG60 (Yaroma) ซึ่งใช้ C_{BP} เป็นทางส่งผ่านสัญญาณความถี่สูงและป้องกันไฟตรงจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV) เมื่อจะเริ่มทำการวัดตัวแม่จะสั่งปิดตัวแปลงไฟฟ้ากำลัง (DC/AC) จากนั้นก็สร้างโพลดกระแสคงที่ผ่านทาง Q_L ด้วยตัวแปลงดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก (DAC) และวงจรวัดกระแส (Current sense) แล้ววัดแรงดัน (Voltage sense) คร่อมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 ตัว จากนั้นเมื่อตัวแม่ต้องการวัดแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ 1 (PV_1) ก็ส่งคำสั่งให้ตัวลูกตัวที่ 1 ตัวปิดสวิตช์ M_{SW1} กระแสโพลดคงที่ (จาก PV_2 และ PV_3 ไปยัง Q_L) ก็ไหลผ่าน

ไดโอด D_{BP1} ทำให้แรงดันรวมที่คร่อมตัวแม่ลดลงเป็นต้น ด้วยวิธีดังกล่าวนี้ตัวแม่ก็จะสามารถวัดความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (IV curve) ทุกๆแผงได้



รูปที่ 2.7 โครงสร้างอย่างง่ายของระบบจากเอกสารอ้างอิงที่ [12]



รูปที่ 2.8 หลักการส่งข้อมูลผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลังที่มีอยู่เดิมด้วยการเข้ารหัสแบบ CDMA [11]

2.3.3 จากบทความทางวิชาการ [11] ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ตัวลูกจะวัดค่าต่างๆของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แล้วส่งข้อมูลออกด้วยการสร้างสัญญาณขนาด 1 โวลต์ (peak to peak) ผสมไปกับ

แรงดันไฟตรงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการเข้ารหัสแบบ CDMA (Code Division Multiple Access) โดยตัวลูกจะส่งข้อมูลออกไปเรื่อยๆโดยไม่มีการรับข้อมูลใดๆเลย ด้วยวิธีดังกล่าวนี้จึงทำให้สามารถสร้างตัวลูกได้ง่ายและมีราคาถูก แต่ความยากจะไปตกอยู่กับตัวแม่ซึ่งต้องถอดรหัสจากตัวลูกหลายๆตัวที่อาจส่งข้อมูลมาในเวลาใกล้เคียงกัน อีกทั้งยังมีสัญญาณรบกวนบนสายส่งไฟฟ้ากำลังอีกด้วย

สุดท้ายนี้ ถึงแม้ว่าระบบจากบทความทางวิชาการต่างๆในหัวข้อ 2.2.2 และ 2.3.1 – 2.3.3 จะมีเทคนิคที่น่าสนใจ แต่ก็ยังขาดความสามารถในการใช้งานจริงดังตัวอย่างที่ 2.1 และ 2.2.1 มี อาทิเช่น สามารถเรียงลำดับเลขประจำตัวของตัวตรวจวัดได้อย่างแบบอัตโนมัติสามารถระบุตำแหน่งขาดของสายส่งพลังงานได้ เป็นต้น



บทที่ 3

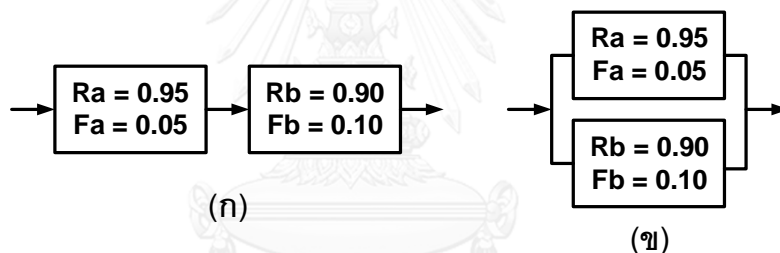
การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของระบบ

ตามปกติแล้วแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีอายุการใช้งานยาวนานถึง 20 ปีเป็นอย่างน้อย ฉะนั้นระบบหรืออุปกรณ์ใดๆที่ติดกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์จึงควรมีอายุที่ใกล้เคียงแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยเหตุนี้จึงได้กล่าวถึงการประมาณความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในบทนี้

3.1 หลักการพื้นฐานของการคำนวณความน่าเชื่อถือของระบบ

อ้างอิงจากเอกสาร [15] หัวข้อที่ 5.4.2 (Reliability Modeling of Simple Structures) กำหนดให้โอกาสที่อุปกรณ์ A มีโอกาสเสียในระยะเวลาหนึ่งๆ คือ $F_A(t)$ (Failure possibility of A) และความน่าเชื่อถือหรือโอกาสที่อุปกรณ์ A จะยังคงใช้งานได้ในช่วงเวลาหนึ่งๆ คือ $R_A(t)$ (Reliability possibility of A) โดยที่ $F_A(t)$ และ $R_A(t)$ มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$F_A(t) = 1 - R_A(t) \quad (3-1)$$



รูปที่ 3.1 ระบบที่ทำงานต่อเนืองกัน และระบบที่ทำงานเดียวกันแบบขนาน

รูปที่ 3.1 (ก) แสดงระบบที่ 1 (SYS1) มีอุปกรณ์ 2 ตัว A และ B “ทำงานต่อเนืองกัน” ถ้าใช้ไป 20 ปีแล้วอุปกรณ์ A มีโอกาสเสีย 5% ($F_A = 0.05$) และ อุปกรณ์ B มีโอกาสเสีย 10% ($F_B = 0.1$) ระบบที่ 1 จะมีความน่าเชื่อถือน้อยลงหรือโอกาสเสียมากขึ้น ดังสมการที่ (3-2) และ (3-3) ตามลำดับ

$$R_{SYS1} = R_A \cdot R_B = (1-0.05) \times (1-0.1) = 0.855 = 85.5\% \quad (3-2)$$

$$F_{SYS1} = 1 - R_A R_B = F_A + R_A F_B = F_B + R_B F_A = 1 - 0.855 = 0.145 = 14.5\% \quad (3-2)$$

รูปที่ 3.1 (ข) แสดงระบบที่ 2 (SYS2) มีอุปกรณ์ 2 ตัว A และ B “ทำงานเดียวกันแบบขนาน” (ทำงานซ้ำกัน) ระบบที่ 2 จะมีความน่าเชื่อถือมากขึ้นหรือโอกาสเสียน้อยลง ดังสมการที่ (3-4) และ (3-5) ตามลำดับ

$$R_{SYS2} = 1 - F_A F_B = R_A + F_A R_B = R_B + F_B R_A = 0.995 = 99.5\% \quad (3-3)$$

$$F_{SYS2} = F_A F_B = 0.005 = 0.5\% \quad (3-4)$$

3.2 การประมาณโอกาสเสียของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

การประมาณความน่าเชื่อถือ (Reliability) $R(t)$ ของอุปกรณ์ประเภทเครื่องจักรจะใช้แบบจำลอง normal distribution หรือ Weibull distribution แต่สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะใช้แบบจำลองเอ็กโปเนนเชียล [16, 17] ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลาดังสมการที่ (3-5) หรืออาจจะมองในมุมมองของโอกาสเสีย $F(t)$ ของอุปกรณ์ดังสมการที่ (3-6) ก็ได้

$$R(t) = \exp(-\lambda t) = \exp(-t / \text{MTBF}) \quad (3-5)$$

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (3-6)$$

$$\lambda = 1 / \text{MTBF} \quad (3-7)$$

λ คืออัตราความขัดข้องของอุปกรณ์ (failure rate) หรืออาจมองเป็นค่า MTBF ซึ่งหมายถึง ค่าคงที่ของเวลาขัดข้องเฉลี่ย (Mean Time Between Failure) ก็ได้ ค่า MTBF ของอุปกรณ์สามารถหาได้จากผู้ผลิตวางจรรวมรายใหญ่ อาทิเช่น Atmel, Philips NXP, ... เป็นต้น แต่โดยส่วนมากแล้วจะไม่ระบุไว้ อีกวิธีหนึ่งคือการประมาณได้ด้วยสูตรการคำนวณในเอกสาร MIL-HDBK-217F [16] ซึ่งเปิดเผยสู่สาธารณะโดยกระทรวงกลาโหมประเทศสหรัฐอเมริกาในปี ค.ศ. 1991 มีการประมาณค่า λ ของอุปกรณ์ตั้งแต่ ตัวต้านทาน ตัวประจุ ไดโอดทรานซิสเตอร์ วงจรรวมขนาดต่างๆ ตลอดจน ขั้วต่อสายไฟ เป็นต้น

ตารางที่ 3.1 ค่าคงที่ของเวลาขัดข้องเฉลี่ย (MTBF) ของอุปกรณ์ต่างๆที่คำนวณจาก MIL-HDBK-217F [16]

No	รายการอุปกรณ์	MTBF (ปี)			
		25 C	35 C	55 C	75 C
1	ไมโครโปรเซสเซอร์ CMOS 8-bit	4,077	2,548	1,165	574
2	ดิจิตอลเกต CMOS, 1 – 100 เกต	57,078	35,674	16,308	8,039
3	ดิจิตอลเกต CMOS, 101 – 1000 เกต	28,539	17,837	8,154	4,020
4	ดิจิตอลเกต CMOS, 1001 – 3000 เกต	14,269	8,918	4,077	2,010
5	หน่วยความจำ Floating gate tunnel oxide (FLOTOX), 2 - 8kByte	78,793	56,390	23,757	9,221
6	วงจรรเชิงเส้น CMOS/Bipolar, 101- 300ทรานซิสเตอร์	28,539	12,408	2,854	751
7	วงจรรเชิงเส้น CMOS/Bipolar, 101- 300ทรานซิสเตอร์ +15C ขณะใช้งานที่อุณหภูมิภายนอก 35C, 55C, 75C	28,539	4,020	1,019	307

8	ตัวส่งสัญญาณแสง Opto-transistor, JANTX (รวมตัวถังแล้ว)	1,829	1,307	762	481
9	ตัวถัง DIP / SMD, 8 ขา	10,976			
10	ตัวถัง DIP / SMD, 16 ขา	5,096			
11	ตัวถัง DIP / SMD, 28 ขา	2,854			
12	เชื่อมต่อด้วยการบัดกรีและหุ้มเพื่อป้องกันแรงกระชาก	815,390			
13	เชื่อมต่อด้วย Terminal block	921			
14	ขั้วต่อแบบกลม ไม่ถอดเข้า - ออก สภาพมีแคดมีฟน	28,397	23,782	17,296	13,374

สำหรับการคำนวณความน่าเชื่อถือของระบบหนึ่งๆที่ประกอบขึ้นด้วยอุปกรณ์หลายๆตัว จะใช้วิธีการคำนวณอย่างง่ายซึ่งมีชื่อเรียกว่า *Part Count Method* วิธีนี้อยู่บนสมมติฐานที่ว่า อุปกรณ์ทุกๆตัวจะมีโอกาสเสียเป็นอิสระต่อกัน (independent) และเกิดขึ้นแบบสุ่ม (random) และถ้าอุปกรณ์ตัวใดตัวหนึ่งในระบบเสียก็จะถือว่าระบบนั้นเสีย ฉะนั้นถ้าระบบหนึ่งๆที่ประกอบขึ้นด้วยอุปกรณ์ N ตัว เราจะได้ความน่าเชื่อถือของระบบ $R_{SYS}(t)$ ดังสมการที่ (3-8) และจะได้ λ_{SYS} ดังสมการที่ (3-9)

$$R_{SYS}(t) = \prod_{i=1}^N R_i(t) = \prod_{i=1}^N \exp(-\lambda_i t) = \exp(-\lambda_{SYS} t) \quad (3-8)$$

$$\lambda_{SYS} = \frac{1}{MTBF_{SYS}} = \sum_{i=1}^N \lambda_i = \sum_{i=1}^N \frac{1}{MTBF_i} \quad (3-9)$$

ตัวอย่างการคำนวณอายุด้วย *Part Count Method* ของไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาดเล็กตัวหนึ่ง (MCU1) ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ 4 ส่วนดังนี้ ไมโครโปรเซสเซอร์ (No. 1) ดิจิตอลเกตสำหรับทำอุปกรณ์รอบๆโปรเซสเซอร์ (No. 3) หน่วยความจำสำหรับเก็บโปรแกรม (No. 5) ตัวถังแบบ SMD 16 ขา (No.10) โดยที่แต่ละส่วนมีค่า MTBF ดังตารางที่ 3.1 ตัวอย่างเช่น การคำนวณ λ_{MCU1} ที่อุณหภูมิ 25C และ 55C ด้วยสมการที่ (3-9) สามารถทำได้ดังนี้

$$\lambda_{MCU1_25C} = \frac{1}{MTBF_{MCU1_25C}} = \frac{1}{4077} + \frac{1}{28539} + \frac{1}{78793} + \frac{1}{5096} = \frac{1}{2043.98 \text{ years}}$$

$$\lambda_{MCU1_55C} = \frac{1}{MTBF_{MCU1_55C}} = \frac{1}{1165} + \frac{1}{8154} + \frac{1}{23757} + \frac{1}{5096} = \frac{1}{820.12 \text{ years}}$$

ถ้าสมมติให้ใน 1 วันมี 4 ชั่วโมงที่ 75C, 3 ชั่วโมงที่ 55C, 3 ชั่วโมงที่ 35C และ 14 ชั่วโมงที่ 25C จะสามารถคำนวณความน่าเชื่อถือของ MCU1 ใน 20 ปี $R_{MCU1}(20)$ และคำนวณโอกาสขัดข้องใน 20 ปี $F_{MCU1}(20)$ ได้ดังนี้

$$R_{MCU1}(20) = \exp \left[20 \times \left(\frac{14}{24} \lambda_{MCU1_25C} + \frac{3}{24} \lambda_{MCU1_35C} + \frac{3}{24} \lambda_{MCU1_55C} + \frac{4}{24} \lambda_{MCU1_75C} \right) \right] \quad (3-10)$$

$$F_{MCU1}(20) = 1 - R_{MCU1}(20) \quad (3-11)$$

ค่าโอกาสขัดข้องใน 20 ปี $F_{MCU1}(20)$ ที่คำนวณได้ รวมไปถึงของอุปกรณ์ตัวอื่นๆ ได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าโอกาสขัดข้องใน 20 ปีของอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งคำนวณด้วยข้อมูลในตารางที่ 3.1

#	รายการอุปกรณ์	ส่วนประกอบจาก ตาราง 3.1	โอกาสขัดข้อง ใน 20 ปี*	
1	ไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาดเล็ก 4kB 16 ขา	No 1+3+5+10	F_{MCU1}	1.35 %
2	ตัวแปลงแรงดันเป็นความถี่ 8 ขา	No 6+9	F_{V2F}	0.66 %
3	ตัวส่งสัญญาณ 16 ขา	No 2+10	F_{MUX}	0.28 %
4	ตัวส่งสัญญาณแสง (opto-coupler)	No 8	F_{OPTO}	1.34 %
5	สายสัญญาณขั้วต่อแบบกลม ภายในมี 5 เส้น	No 11 x 20 + 14	F_{W1}	0.085 %
6	ไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาดกลาง 8kB 28 ขา+ADC	No 1+4+5+6+11	F_{MCU2}	2.20 %
7	ตัวควบคุมแรงดันแบบสลับ (switching regulator) 8 ขา (power loss = 375mW, $\theta_{JA} = 40 \text{ C/W}$)	No 7+9	F_{REG}	1.49 %
8	ตัวรับส่งคลื่นความถี่วิทยุ (wireless communication network) 16 ขา	No 1+6+10	F_{RF}	1.71 %
9	สายสัญญาณขั้วต่อแบบกลม ภายในมี 1 เส้น	No 11 x 4 + 14	F_{W2}	0.064 %

* ให้ 1 วันมี 4 ชั่วโมงที่ 75C, 3 ชั่วโมงที่ 55C, 3 ชั่วโมงที่ 35C และ 14 ชั่วโมงที่ 25C

3.3 การประมาณโอกาสเสียของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

สำหรับการเสื่อมสภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้มีการทดลองใช้งานจริง [18] โดยกระทรวงสิ่งแวดล้อมประเทศสวิสเซอร์แลนด์ได้เริ่มโครงการและติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ตัวอย่าง ด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 37W จำนวน 252 แผงในระหว่างปี คศ.1982-2003 และพบว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพลดลงดังตารางที่ 3.3 แต่ถึงอย่างไรก็ดีในปัจจุบันนี้ (2012) คุณภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ถูกพัฒนาขึ้น โดยผู้ผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนใหญ่จะรับประกันความเสื่อมของตัวแผงไว้ที่ 20% ภายใน 20 ปี

ตารางที่ 3.3 ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หลังผ่านการใช้งานมาแล้ว 20 ปี [18]

ลดลงน้อยกว่า 10%	ลดลง 10% - 20%	ลดลงมากกว่า 20%	เสียหาย
142 แผง	92 แผง	17 แผง	1 แผง

ข้อมูลจากการทดลองใช้งานจริงนี้สามารถนำมาใช้คำนวณค่า MTBF ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังสมการที่ (3-12) [17, 19, 20]

$$MTBF = \frac{2 \times N \times T}{\chi^2(\alpha, 2r+2)} \quad (3-12)$$

N = จำนวนตัวอย่างในการทดลอง T = เวลาที่ใช้ทำการทดลอง r = จำนวนของเสีย χ^2 คือค่า chi-square มีค่าดังตารางที่ 3.4 ส่วนค่า $1 - \alpha$ เป็นระดับความน่าเชื่อถือ (Confidential level) ของค่าทางสถิติที่คำนวณได้โดยทฤษฎีทางสถิติแล้วถ้าตัวอย่างที่ใช้ในการคำนวณค่าทางสถิติมีปริมาณมากค่าทางสถิติที่คำนวณได้ก็จะใกล้เคียงความจริงมากขึ้น แต่เนื่องจากจำนวนตัวอย่างมีปริมาณจำกัดจึงได้มีการระบุระดับความน่าเชื่อถือ (Confidential level) ของค่าทางสถิติที่คำนวณได้ไว้ด้วย

ตารางที่ 3.4 ค่า chi square (χ^2) - จากเอกสารอ้างอิง [17] บทที่ 8 หน้า 44

	r	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
χ^2	$1 - \alpha = 0.9$	4.61	7.78	10.6	13.4	16.0	18.5	21.1	23.5	26.0	28.4
χ^2	$1 - \alpha = 0.8$	3.22	5.99	8.56	11.0	13.4	15.8	18.2	20.5	22.8	25.0

ถ้าเราเลือกใช้ค่า chi square ที่ความน่าเชื่อถือคือ 90% ($1 - \alpha = 0.9$) จากข้อมูลใน

ตารางที่ 3.3 พบว่าการทดลองใช้งานจริง 20 ปีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 37W จำนวน 252 แผงมีเพียง 1 แผงที่เสียหายใช้งานไม่ได้ และเมื่อแทนค่าเหล่านี้ลงในสมการที่ (3-12) จะได้ตั้งสมการที่ (3-13) ซึ่งหมายความว่า 90% ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นี้จะมีค่า $MTBF_{PV} > 1,295$ ปี

$$MTBF_{PV} = (2 \times 252 \text{ แผง} \times 20 \text{ ปี}) / 7.78 = 1,295 \text{ ปี} \quad (3-13)$$

ด้วยสมการที่ (3-4) และ (3-5) จะประมาณโอกาสเสียหายใช้งานไม่ได้ภายใน 20 ปีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นี้ได้ดังนี้

$$F_{PV}(20) = 1 - \exp(-20 \text{ ปี} / 1,295 \text{ ปี}) = 0.015 = 1.5 \% \quad (3-14)$$

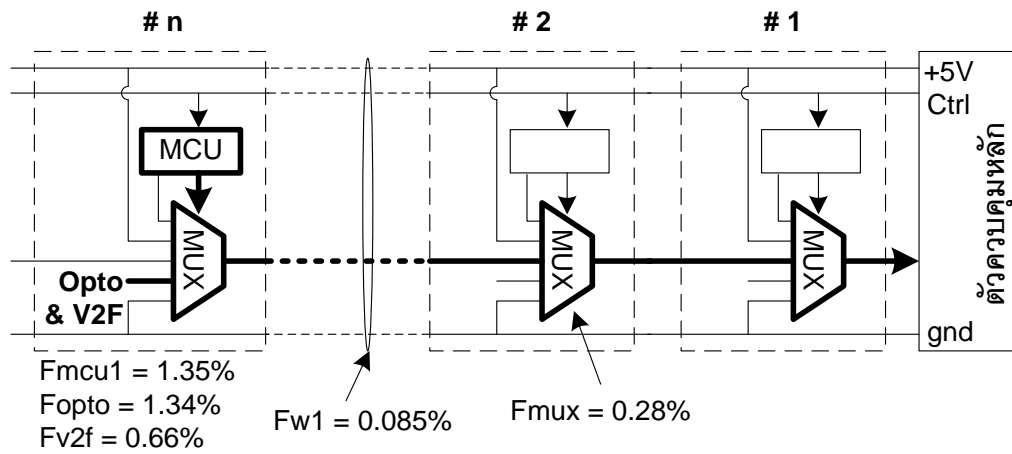
3.4 การประมาณโอกาสเสียของระบบตรวจวัดตัวอย่างที่ 1 ในหัวข้อ 2.1

รูปที่ 3.2 แสดงเส้นทางสัญญาณระหว่างตัวตรวจวัดตัวที่ n ($n = 1, 2, \dots, N$) และตัวควบคุมหลักของระบบตรวจวัดตัวอย่างในหัวข้อที่ 2.1 ซึ่งต้องผ่านตัวสลับสัญญาณ (MUX) n ตัว สายส่งสัญญาณ (W1) n เส้น ไมโครคอนโทรลเลอร์ของตัวตรวจวัดตัวที่ n (MCU1) หนึ่งตัว ตัวส่งสัญญาณแสงตัวที่ n (OPTO) หนึ่งตัว และตัวแปลงแรงดันเป็นความถี่ตัวที่ n (V2F) หนึ่งตัว โดยถ้าอุปกรณ์ตัวใดตัวหนึ่งเสียก็จะไม่สามารถวัดแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ n ได้ เราสามารถคำนวณโอกาสที่ระบบตรวจวัดไม่สามารถวัดแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ n , $F_{SYS_EX1}(n)$ ได้ตั้งสมการที่ (3-15) ซึ่งมีค่าแปรตามตำแหน่ง n และเมื่อใช้ค่าโอกาสขัดข้องใน 20 ปีจากตารางที่ 3.2 จะคำนวณ $F_{SYS_EX1}(n)$ ได้ตั้งตารางที่ 3.5 ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าเป็นระบบที่ทำงานแบบต่อเนื่องกันดังรูปที่ 3.1 (ก) ทำให้โอกาสเสียของระบบมีมากขึ้น

$$F_{SYS_EX1}(n) = 1 - R_{MUX}^n \times R_{W1}^n \times R_{MCU1} \times R_{OPTO} \times R_{V2F} \quad (3-15)$$

ตารางที่ 3.5 ค่าโอกาสเสียภายใน 20 ปีของระบบตรวจวัดตัวอย่างในหัวข้อที่ 2.1 ที่ตำแหน่ง n

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$F_{SYS_EX1}(n)$	3.6 %	4.0 %	4.4 %	4.7 %	5.1 %	5.4 %	5.8 %	6.1 %	6.4 %	6.8 %

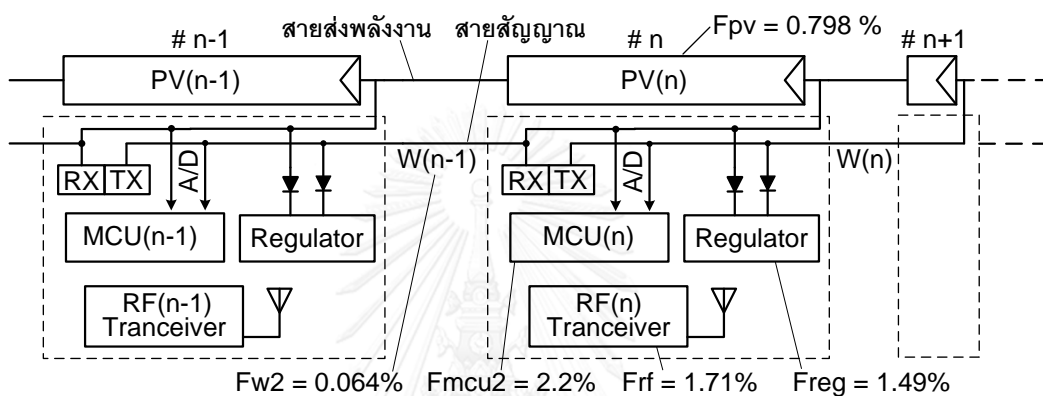


รูปที่ 3.2 เส้นทางสัญญาณระหว่างตัวตรวจวัดตัวที่ n และตัวควบคุมหลัก
ของระบบตรวจวัดตัวอย่างในหัวข้อที่ 2.1



3.5 การประมาณโอกาสเสียของระบบตรวจวัดตัวอย่างที่ 2 ในหัวข้อ 2.2

รูปที่ 3.3 แสดงระบบตรวจวัดตัวอย่างที่ 2 ในหัวข้อที่ 2.2 ระบบนี้สามารถวัดแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ n ได้ด้วยตัวตรวจวัดตัวที่ n และถ้าตัวตรวจวัดตัวที่ n เสียตัวตรวจวัดตัวที่ $n-1$ ก็ยังคงทำงานแทนได้ ยิ่งไปกว่านั้นถ้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ n เสียจนไม่สามารถจ่ายพลังงานได้ตัวตรวจวัดตัวที่ n ยังคงสามารถใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ $n+1$ ได้อีกด้วย โดยจะเห็นได้ชัดว่าระบบตรวจวัดตัวอย่างที่ 2 นี้ใช้หลักการ “ทำงานเดียวกันแบบขนาน” ดังรูปที่ 3.1 (ข) เพื่อช่วยลดโอกาสเสียให้น้อยลง



รูปที่ 3.3 ระบบตรวจวัดตัวอย่างที่ 2 ในหัวข้อที่ 2.2

3.5.1 กรณีที่ระบบนี้ไม่มีการทำงานเดียวกันแบบขนาน หรือตรวจวัดตัวที่ $n-1$ ไม่สามารถวัดแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ n ได้ และตัวตรวจวัดตัวที่ n ไม่สามารถใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ $n+1$ ได้โอกาสที่ระบบตรวจวัดไม่สามารถวัดแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ n ได้ F_{SYS_EX2} จะสูงถึง 6.73 % ดังสมการที่ (3-16)

$$F_{SYS_EX2} = 1 - R_{PV} \times R_{REG} \times R_{MCU2} \times R_{RF} = 0.0673 = 6.73 \% \quad (3-16)$$

3.5.2 กรณีที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ n ถูกวัดแรงดันด้วยตัวตรวจวัดตัวที่ n และตัวที่ $n-1$ ได้ 2 ตัว ถ้าตัวที่ n เสียก็ยังมีอีกตัวที่ $n-1$ ทำการวัดให้ได้ เป็นการงานเดียวกันแบบขนาน (หรือการทำงานแบบซ้ำซ้อน) และเมื่อจำแนกต่อไปอย่างละเอียดแล้วเราสามารถแยกกรณีซึ่งสามารถวัดแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ n แบบไม่ซ้ำกันได้ถึง 5 แบบดังตารางที่ 3.6 กรณีทั้ง 5 นี้สามารถนำมาคำนวณโอกาสที่ระบบตรวจวัดยังคงสามารถวัดแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ n ได้ R_{SYS_EX2} ดังสมการที่ (3-17) ซึ่งโอกาสที่ระบบตรวจวัดไม่สามารถวัดแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ n ได้ F_{SYS_EX2} จะเหลือเพียงแค่ 0.29 % ดังสมการที่ (3-18)

ตารางที่ 3.6 แบบที่เป็นไปได้ทั้งหมดของการวัดแรงดันคร่อมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ n ของระบบตรวจวัดตัวอย่างที่ 2 ในหัวข้อที่ 2.2

R_N	PV(n)	Reg(n) & MCU(n) & RF(n)	W(n) & PV(n+1)	W(n-1) & Reg(n-1) & MCU(n-1) & RF(n-1)	PV(n-1)
1	ดี	ดี	-	-	-
2	เสีย	ดี	ดี	-	-
3	เสีย	ดี	เสีย	ดี	ดี
4	ดี	เสีย	-	ดี	-
5	เสีย	เสีย	-	ดี	ดี

หมายเหตุ ละเอียดการสื่อสารระหว่างสาย (Tx, Rx module) ของระบบตรวจวัดตัวอย่างที่ 2

$$R_{SYS_EX2} = R_{แบบ1} + R_{แบบ2} + R_{แบบ3} + R_{แบบ4} + R_{แบบ5} = 0.9971 = 99.71 \% \quad (3-17)$$

$$R_{แบบ1} = R_{PV(n)} \cdot (R_{REG(n)} \cdot R_{MCU2(n)} \cdot R_{RF(n)})$$

$$R_{แบบ2} = F_{PV(n)} \cdot (R_{REG(n)} \cdot R_{MCU2(n)} \cdot R_{RF(n)}) \cdot (R_{W2(n)} \cdot R_{PV(n+1)})$$

$$R_{แบบ3} = F_{PV(n)} \cdot (R_{REG(n)} \cdot R_{MCU2(n)} \cdot R_{RF(n)}) \cdot (1 - R_{W2(n)} \cdot R_{PV(n+1)}) \cdot (R_{W2(n-1)} \cdot R_{REG(n-1)} \cdot R_{MCU2(n-1)} \cdot R_{RF(n-1)}) \cdot R_{PV(n-1)}$$

$$R_{แบบ4} = R_{PV(n)} \cdot (1 - R_{REG(n)} \cdot R_{MCU2(n)} \cdot R_{RF(n)}) \cdot (R_{W2(n-1)} \cdot R_{REG(n-1)} \cdot R_{MCU2(n-1)} \cdot R_{RF(n-1)})$$

$$R_{แบบ5} = F_{PV(n)} \cdot (1 - R_{REG(n)} \cdot R_{MCU2(n)} \cdot R_{RF(n)}) \cdot (R_{W2(n-1)} \cdot R_{REG(n-1)} \cdot R_{MCU2(n-1)} \cdot R_{RF(n-1)}) \cdot R_{PV(n-1)}$$

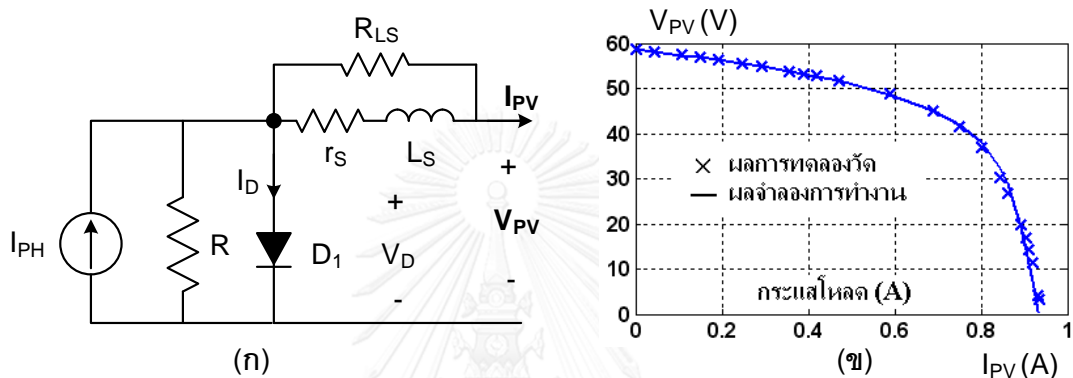
$$F_{SYS_EX2} = 1 - R_{SYS_EX2} = 0.29 \% \quad (3-18)$$

สุดท้ายนี้ การคำนวณความน่าเชื่อถือดังกล่าวอยู่บนพื้นฐานของการสมมติให้อุปกรณ์ทุกๆตัวมีโอกาสเสียเป็นอิสระต่อกัน (Independent) และเกิดขึ้นแบบสุ่ม (random) รวมไปถึงทฤษฎีและประสบการณ์ตามเอกสาร MIL-HDBK-217F [16] เท่านั้น ฉะนั้นจึงยังคงจำเป็นต้องมีการเก็บข้อมูลจากการทดลองใช้งานอีกจำนวนหนึ่งเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ใกล้เคียงความจริง ถึงอย่างไรก็ดี ผลการประมาณโอกาสเสียในบทที่ 3 นี้สามารถสรุปได้ว่า ระบบที่ทำงานเดียวกันแบบต่อเนื่องระบบดังหัวข้อ 3.4 หรือระบบที่มีความซับซ้อนมากขึ้นดังหัวข้อ 3.5.1 จะเพิ่มโอกาสเสียให้กับระบบแต่ระบบที่ทำงานซ้ำกันแบบขนานดังหัวข้อ 3.5.2 จะช่วยลดโอกาสเสียของระบบลงได้มาก

บทที่ 4

ลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

เนื่องด้วยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอระบบตรวจวัดแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้การสื่อสารผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลังซึ่งมีแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อแบบอนุกรมหลายๆแผง ดังนั้นความเข้าใจถึงคุณลักษณะทางไฟฟ้าและวงจรจำลอง (circuit model) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการออกแบบวงจรและจำลองการทำงานในบทต่อไป



รูปที่ 4.1 (ก) วงจรจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์อย่างง่าย (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Amorphous silicon ขนาด 40 วัตต์

วงจรจำลองแบบหนึ่งของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ดังรูปที่ 4.1 (ก) มีส่วนประกอบหลักคือ แหล่งกระแสซึ่งมีขนาดกระแสแปรตามความเข้มของแสงอาทิตย์ (Photo current, I_{PH}) และไดโอดหรือรอยต่อพีเอ็น (PN junction) ซึ่งเป็นลักษณะทางกายภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยแบบจำลองระดับที่ 1 (level 1 model) [21] กระแสที่ไหลผ่านไดโอดจะเป็นดังสมการที่ (4-1) ซึ่งมีพารามิเตอร์ 3 ตัว คือ I_0 (Dark saturation current), n (Diode quality factor), V_T (Thermal voltage) ซึ่ง ณ ที่นี้สมมติให้เป็นค่าคงที่ 0.0259 mV ที่อุณหภูมิ 25C

$$I_D = I_0 \times \left(\exp\left(\frac{V_D}{nV_T}\right) - 1 \right) \quad (4-1)$$

จากวงจรจำลองในรูปที่ 4.1 (ก) เมื่อละเลย R_{LS} ($R_{LS} = \infty$) จะได้

$$V_D = V_{PV} + I_{PV} \times r_s \quad (4-2)$$

$$I_{PV} = I_D + \frac{V_D}{R} - I_{PH} \quad (4-3)$$

และจากสมการที่ (4-1) ถึง (4-3) เราสามารถกำจัด V_D และ I_D ออกจนเหลือความสัมพันธ์ระหว่าง V_{PV} และ I_{PV} โดยมีพารามิเตอร์ I_{PH} , I_0 , n , R , r_s เป็นค่าคงที่ดังนี้

$$I_{PV} = I_O \times \left(\exp\left(\frac{V_{PV} + I_{PV} \times r_s}{n \times V_T}\right) - 1 \right) + \frac{V_{PV} + I_{PV} \times r_s}{R} - I_{PH} \quad (4-4)$$

สำหรับการแก้สมการซึ่งมีตัวแปร V_{PV} (หรือ I_{PV}) อยู่ทั้งในและนอกฟังก์ชัน \exp นี้สามารถใช้ฟังก์ชัน `fsolve` ในโปรแกรม MATLAB ช่วยคำนวณได้

ภายใต้แสงแสงอาทิตย์ เราสามารถวัดความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Amorphous silicon ขนาด 40 วัตต์ได้ดังเครื่องหมายกากบาทในกราฟรูปที่ 4.1 (ข) จากผลการวัดที่ได้นี้ผนวกกับสมการที่ (4-4) เราสามารถใช้ฟังก์ชัน `lsqcurvefit` ในโปรแกรม MATLAB ช่วยทำ curve fitting หรือก็คือการหาค่าพารามิเตอร์ I_{PH} , I_O , n , R , r_s ซึ่งทำให้ความสัมพันธ์ของ V_{PV} และ I_{PV} ในสมการที่ (4-4) มีค่าใกล้เคียงกับผลข้อมูลที่วัดมาได้มากที่สุด สำหรับตัวอย่างโปรแกรม MATLAB ดังกล่าวได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก และค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้เป็นดังค่าในตารางที่ 4.1 และเมื่อนำพารามิเตอร์เหล่านี้แทนลงในสมการที่ (4-4) ก็ได้ความสัมพันธ์ของ V_{PV} และ I_{PV} ดังเส้นกราฟในรูปที่ 4.1 (ข)

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Amorphous silicon ขนาด 40 วัตต์แผงหนึ่ง

	ชื่อพารามิเตอร์		
I_{PH}	Photo current	0.94	A
I_O	Dark saturation current	170u	A
n	Diode quality factor	265	-
R	Parallel resistor	490	Ω
r_s	Series resistor	2.82	Ω
C_{j0}	Zero-bias junction capacitor or dark illumination capacitance	92.3	nF
TT	Transit time (τ_T)	7	us
PB	Junction contact potential	200	V
L_s	Series inductor	0.8	uH
R_{Ls}	Parallel inductive resistor	85	Ω

สำหรับค่าความจุทางไฟฟ้า (Capacitance) ของรอยต่อพีเอ็นซึ่งเป็นลักษณะทางกายภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ หากจำลองด้วยแบบจำลองไดโอดระดับที่ 1 [21] จะแบ่งออกเป็น depletion

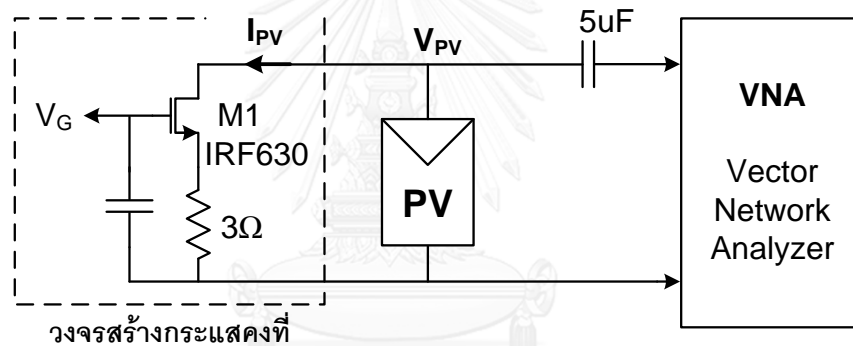
capacitance, C_J และ diffusion capacitance, C_D ในขณะที่แรงดันคร่อมไดโอดมากกว่าศูนย์ ($V_D > 0$ หรือ forward bias) จะประมาณค่าได้ตั้งสมการที่ (4-2) และ (4-3) ตามลำดับ C_{J0} คือค่าความจุทางไฟฟ้าที่แรงดันคร่อมตัวไดโอดเป็นศูนย์ ($V_D = 0$), MJ (Area junction grading coefficient) มีค่าโดยปริยาย (default) เป็น 0.5, PB (Area junction contact potential) และ TT (Transit time)

$$C_J = C_{J0} + (1 + MJ \times \frac{V_D}{PB}) \quad (4-5)$$

$$C_D = TT \times \frac{\partial I_D}{\partial V_D} \quad (4-6)$$

และเมื่อแทนสมการที่ (4-1) ลงในสมการที่ (4-6) จะได้

$$C_D = TT \times \frac{I_D + I_0}{n \times V_T} \quad (4-7)$$

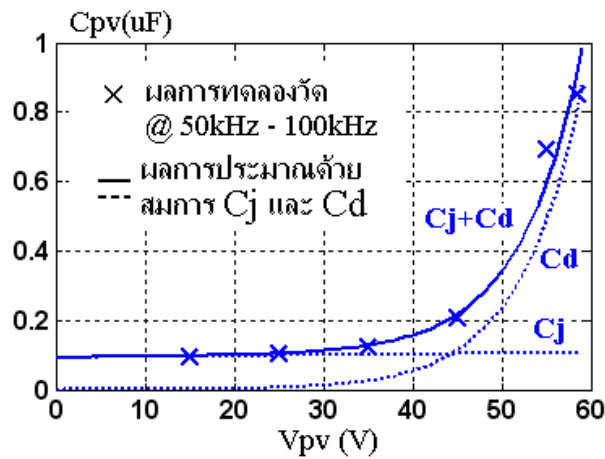


รูปที่ 4.2 วงจรทดลองที่ใช้วัดค่าความจุของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเครื่อง VNA2180

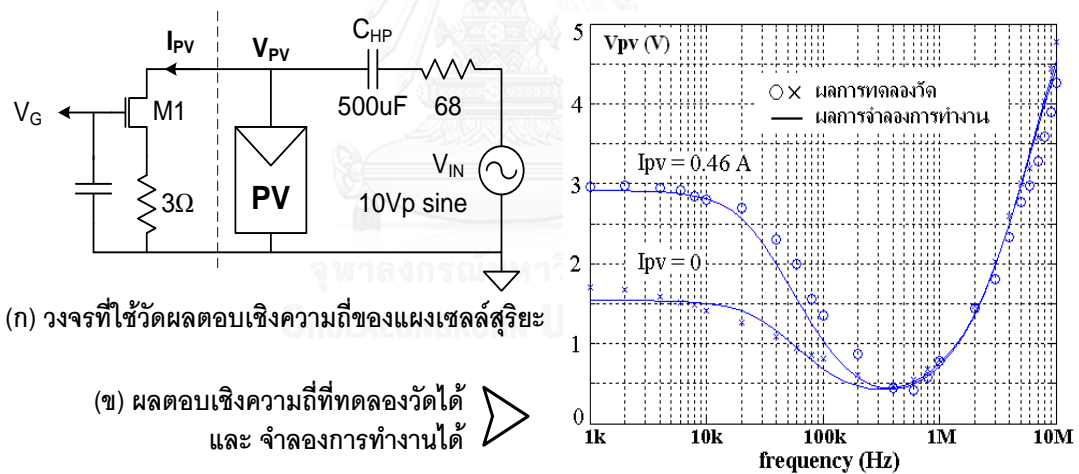
วงจรทดลองดังรูปที่ 4.2 ใช้สำหรับวัดค่าความจุทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ตัวเก็บประจุชนิด polypropylene ขนาด 5uF ใช้เพื่อป้องกันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไหลเข้าเครื่อง Vector network analyzer (VNA2180) วงจรสร้างแหล่งกระแสที่สามารถปรับกระแส I_{PV} ได้ด้วยการปรับแรงดัน V_G และวัดกระแส I_{PV} ได้ด้วยการวัดแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน 3 Ω

จากนั้นจึงวางแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสงอาทิตย์ที่ระดับความเข้มคงที่ระดับหนึ่งแล้วปรับแรงดัน V_{PV} ด้วยการปรับ I_{PV} (หรือ V_G) จะวัดค่าความจุทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตั้งเครื่องหมายกากบาทในกราฟรูปที่ 4.3 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อดึงกระแส I_{PV} ออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มากขึ้น V_{PV} จะลดลงดังกราฟรูปที่ 4.1 (ข) ค่า C_D ที่วัดได้ก็จะลดลงด้วยซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าที่ความเข้มแสงค่าคงที่ (I_{PH} คงที่) กระแส I_{PV} ที่มากขึ้นจะลดกระแส I_D ที่ไหลผ่านไดโอดในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลงตามสมการที่ (4-3) จึงทำให้ C_D ลดลงด้วยตามสมการที่ (4-7) สำหรับความถี่ที่ใช้วัดค่า

ความจุทางไฟฟ้านี้อยู่ที่ 50 kHz – 100 kHz เนื่องจากตัวเก็บประจุชนิด polypropylene ขนาด 5uF ที่ใช้มี self-resonance (f_{SR}) ที่ความถี่ 250 kHz ส่วนเส้นกราฟในรูปที่ 4.3 ได้จากการคำนวณ $C_{pv} = C_J + C_D$ ด้วยสมการที่ (4-5) และ (4-7) โดยใช้พารามิเตอร์ C_{J0} , PB, TT ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสมการดังกล่าวสามารถประมาณค่าความจุของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นี้ได้ดีพอสมควร



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุทางไฟฟ้าและแรงดันคร่อมแผงเซลล์แสงอาทิตย์



(ก) วงจรที่ใช้วัดผลตอบเชิงความถี่ของแผงเซลล์สุริยะ

(ข) ผลตอบเชิงความถี่ที่ทดลองวัดได้ และ จำลองการทำงานได้

รูปที่ 4.4 การทดลองซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในช่วงความถี่ 1kHz – 10MHz

วงจรดังรูปที่ 4.4 (ก) ใช้วัดคุณลักษณะทางไฟฟ้าเชิงความถี่ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ระหว่าง 1kHz – 10MHz กระแสไหลด (I_{pv}) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถปรับได้ที่ขาเกตของ MOSFET M1 และพลังงานที่จ่ายออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะสูญเสียเป็นความร้อนอยู่ที่ M1 นี้ ดังนั้นจึงต้องติด Heat sink ขนาดใหญ่แล้วนำมันแช่ลงในน้ำขณะทำการทดลองด้วย ส่วน C_{HP} นั้นใช้การขนานกันของตัวเก็บประจุแบบ Electrolyte, Tantalum, Polypropylene เพื่อขยายย่านการทำงานของ C_{HP} สำหรับสัญญาณ V_{IN} เป็นสัญญาณรูปไซน์ขนาด 10Vpeak ภายใต้แสงแสงอาทิตย์เราสามารถวัดขนาดแรงดันคร่อมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ V_{pv} ได้ตั้งเครื่องหมายกากบาทและเครื่องหมายวงกลมในรูปที่

4.4 (ข) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์นี้ประพุดิตัวเป็นตัวต้านทานที่ความถี่ต่ำกว่า 10 kHz ในช่วง 10 kHz – 100 kHz จะเริ่มเห็นผลของตัวเก็บประจุในช่วงความถี่ 100kHz – 1MHz และเห็นผลของตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่สูงกว่า 1 MHz ผลการทดลองนี้คล้ายคลึงกับเอกสารอ้างอิง [22, 23] ยิ่งไปกว่านั้นด้วยวงจรจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ดังรูปที่ 4.1 (ก) และค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 4.1 เราสามารถใช้โปรแกรมจำลองการทำงาน (circuit simulator, Hspice 2007) จำลองการทำงานด้วยสัญญาณขนาดเล็ก (AC simulation) ได้ผลดังเส้นกราฟในรูปที่ 4.4 (ข)

สุดท้ายนี้ แบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์นี้เป็นเพียงแบบจำลองที่ระดับความเข้มแสงหนึ่งเท่านั้น ความจริงแล้วค่าพารามิเตอร์ I_0 , n , R_s เหล่านี้ยังแปรตามความเข้มแสงและอุณหภูมิอีกด้วย [24] ค่าความจุของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก็แปรตามความถี่ [25] และยังไม่มีการจำลองการทำงานในช่วง reverse bias ($V_{pv} < 0$) [26] ดังนั้นวงจรจำลองนี้จึงเสมือนจริงที่สภาพการวัดนี้เท่านั้น แต่ก็เพียงพอสำหรับการจำลองการทำงานของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว สำหรับแบบจำลองที่ซับซ้อนขึ้นสามารถศึกษาได้จาก [27-30]

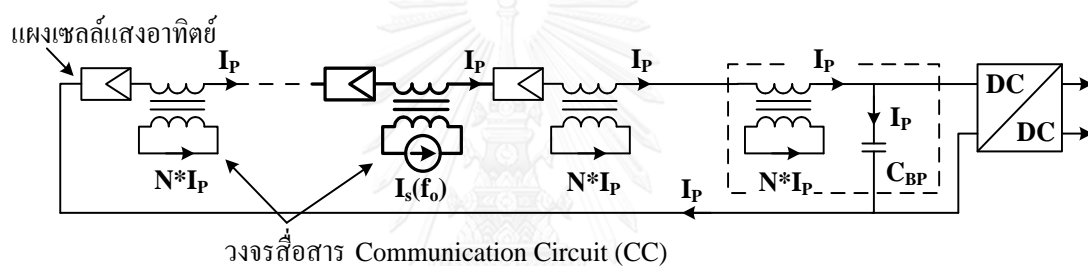


บทที่ 5

การสื่อสารผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลังด้วยวิธีส่งผ่านคลื่นความถี่พาหะทะลุผ่านแผงเซลล์แสงอาทิตย์

โดยปกติแล้วการสื่อสารผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลังจะใช้คลื่นความถี่พาหะในการสื่อสาร (Carrier frequency, f_0) [31] ซึ่งในสหรัฐอเมริกาใช้ความถี่ในย่าน 3 kHz ถึง 525 kHz ตามมาตรฐาน IEC 61000-3-8 ส่วนในยุโรปใช้ความถี่ในย่าน 3 kHz ถึง 148.5 kHz ตามมาตรฐาน EN 50065-1 สำหรับย่านความถี่สูง 1 MHz ถึง 38 MHz [31, 32], มีใช้เป็นโมเด็มความเร็วสูงภายในบ้านโดยใช้การรับส่งหลายช่วงความถี่ (spread spectrum) และหลบบางช่วงความถี่ที่มีใช้อยู่เดิมซึ่งแตกต่างกันในหลายๆประเทศ

5.1 หลักการเบื้องต้นของการส่งผ่านคลื่นความถี่พาหะทะลุผ่านแผงเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 5.1 หลักการส่งผ่านสัญญาณคลื่นพาหะ (f_0) ทะลุผ่านแผงเซลล์แสงอาทิตย์

จากผลตอบสนองเชิงความถี่ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ดังรูปที่ 4.4 จะพบว่าที่ความถี่ระหว่าง 100 kHz – 1 MHz เป็นช่วงที่อิมพีแดนซ์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่ำที่สุด (ประมาณ 5 โอห์ม) ดังนั้นวิธีหนึ่งที่น่าสนใจก็คือ การส่งคลื่นพาหะทะลุผ่านแผงเซลล์แสงอาทิตย์รูปที่ 5.1 นำเสนอหลักการอย่างง่ายด้วยการนำหม้อแปลงไปต่ออนุกรมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทุกๆแผง และที่ตัว DC/DC convertor ซึ่งหม้อแปลงจะไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของสายส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแต่อย่างใด ส่วนวงจรสื่อสารจะต่ออยู่ที่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงและใช้คลื่นพาหะ (f_0) ที่ความถี่ 250 kHz ในการสื่อสาร หลักการทำงานของมันจะเริ่มจากวงจรสื่อสารทุกๆตัวอยู่ในโหมดรับสัญญาณ (receiving mode) เมื่อวงจรสื่อสารตัวใดตัวหนึ่งต้องการส่งข้อมูลก็จะสร้างสัญญาณกระแส $I_s(f_0)$ ที่ความถี่ 250 kHz ที่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง ถ้าสมมติให้หม้อแปลงทุกตัวเป็นอุดมคติซึ่งมีส่วนของด้านปฐมภูมิต่อทุติยภูมิเป็น 1:N จะได้กระแสที่ไหลในสายส่งไฟฟ้ากำลัง (ด้านทุติยภูมิ) คือ $I_p = I_s(f_0) / N$ กระแส I_p นี้จะไหลผ่านหม้อแปลงทุกๆตัวและเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสบนด้านปฐมภูมิขนาด $N \times I_p$ สำหรับ C_{BP} ในวงจรสื่อสารตัวแม่ซึ่งคร่อมสายส่งไฟฟ้ากำลังที่ขาเข้าของตัว DC/DC convertor ใช้สำหรับเป็นทางผ่านของกระแส I_p เพื่อให้มันไหลครบวงจร

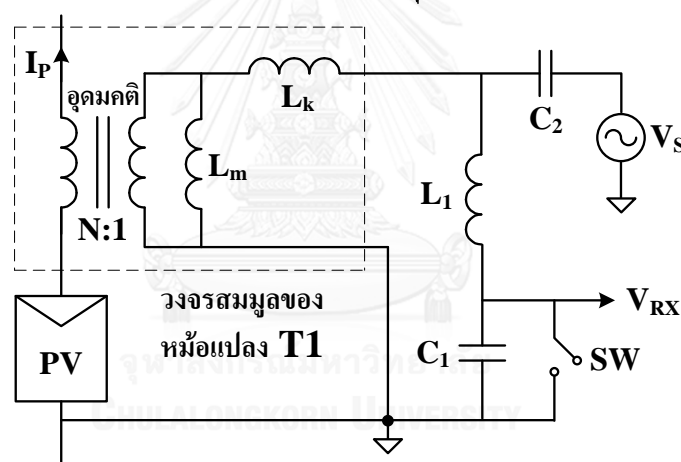
5.2 วงจรและการจำลองการทำงาน

วงจรสื่อสาร (CC) ในรูปที่ 5.1 มีรายละเอียดวงจรดังรูปที่ 5.2 ซึ่งมี V_S เป็นแหล่งกำเนิดแรงดันความถี่ f_0 และ V_{RX} เป็นจุดรับสัญญาณสื่อสาร สวิตช์ SW ใช้สำหรับเลือกโหมดรับและส่ง ถ้าสวิตช์เปิด (opened) ก็จะอยู่ในโหมดรับสัญญาณและถ้าสวิตช์ปิด (shorted) ก็จะอยู่ในโหมดส่งสัญญาณและเพื่อแสดงความไม่อุดมคติของหม้อแปลงในระดับหนึ่ง หม้อแปลงซึ่งมีความเหนี่ยวนำที่ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิเป็น L_p , L_s และมีค่าคงที่การเหนี่ยวนำ (coupling factor) k จะสามารถถูกแทนด้วยวงจรสมมูลแบบหนึ่ง [33] ดังรูปที่ 5.2 ซึ่งประกอบด้วยหม้อแปลงอุดมคติสัดส่วน $N:1$ ตัวเหนี่ยวนำ L_m และ L_k ซึ่งมีความสัมพันธ์ของตัวแปรดังนี้

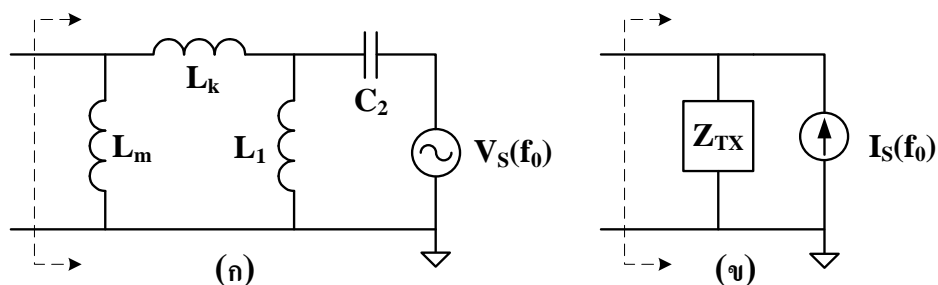
$$L_m = k^2 L_p \quad (5-1)$$

$$L_k = (1 - k^2) \times L_p \quad (5-2)$$

$$N = \frac{1}{k} \times \sqrt{\frac{L_s}{L_p}} \quad (5-3)$$



รูปที่ 5.2 วงจรสื่อสาร Communication Circuit (CC)



รูปที่ 5.3 วงจรสมมูลของวงจรสื่อสารในโหมดส่งสัญญาณ

ในขณะที่ส่งสัญญาณ สวิตช์ SW ปิด (shorted) วงจรดังรูปที่ 5.2 ก็จะเหลือดังรูปที่ 5.3 (ก) และสามารถลดรูปจนได้วงจรสมมูลแบบ Norton ดังรูปที่ 5.3 (ข) โดยที่

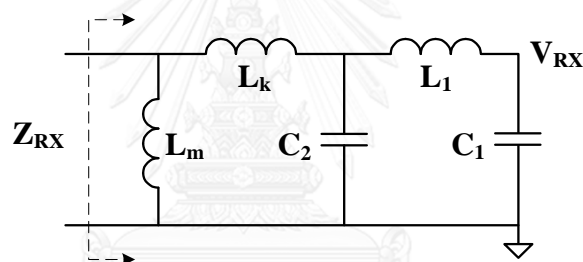
$$Z_{TX} = X_m \parallel (X_k + X_{L1} \parallel X_{C2}) \quad (5-4)$$

$$I_s = \frac{V_s}{X_{C2} + X_k \parallel X_{L1}} \times \frac{X_{L1}}{X_{L1} + X_k} \quad (5-5)$$

โดยที่ $\omega_0 = 2\pi f_0$, $X_m = j\omega_0 L_m$, $X_k = j\omega_0 L_k$, $X_{L1} = j\omega_0 L_1$, $X_{C1} = 1/j\omega_0 C_1$, $X_{C2} = 1/j\omega_0 C_2$ และเครื่องหมาย \parallel หมายถึงการต่อกันแบบขนานและจากสมการที่ (5-4) จะพบว่า Z_{TX} มี complex pole ดังนี้

$$\omega_p^2 = \frac{1}{C_2 (L_m + L_k) \parallel L_1} = \frac{(L_m + L_k + L_1)}{C_2 (L_m + L_k) L_1} = \omega_0^2 \quad (5-6)$$

เพื่อให้การส่งมีประสิทธิภาพมากที่สุดจึงเลือกให้ $\omega_p = \omega_0$ ซึ่งเราจะได้ Z_{TX} และ $I_s = \infty$ แต่ความจริงแล้วค่าจะถูกจำกัดเนื่องจากความไม่อุดมคติของอุปกรณ์ อาทิเช่น ค่าความต้านทานขาออก (source resistance) ของ V_s ที่ไม่เป็นศูนย์ หรือมีความสูญเสียในตัวหม้อแปลงและตัวเหนี่ยวนำเป็นต้น



รูปที่ 5.4 วงจรสื่อสารในโหมดรับสัญญาณ

ในขณะรับสัญญาณ สวิตช์ SW เปิด (opened) และ V_s เป็นศูนย์โวลต์ ก็จะเหลือดังรูปที่ 5.4 ซึ่งสามารถคำนวณเป็น Z_{RX} และ V_{RX} ได้ดังนี้

$$Z_{RX} = X_m \parallel (X_k + X_{C2} \parallel (X_{L1} + X_{C1})) \quad (5-7)$$

$$V_{RX} = N \times I_p \times \frac{X_m}{X_m + X_k + (X_{C2} \parallel (X_{L1} + X_{C1}))} \times \frac{X_{C2}}{X_{C2} + X_{C1} + X_{L1}} \times X_{C1} \quad (5-8)$$

เนื่องจากการต่ออนุกรมกันของหม้อแปลงบนสายส่งไฟฟ้ากำลัง การเลือกให้ Z_{RX} เป็นศูนย์ที่ความถี่ ω_0 จะทำให้กระแส I_p ไหลผ่านได้ง่ายที่สุดซึ่งการทำให้ Z_{RX} เป็นศูนย์นั้นก็คือการทำให้พจน์ในสมการที่ (5-7) เป็นศูนย์นั่นเอง

$$X_k + X_{C2} \parallel (X_{L1} + X_{C1}) = 0 \quad (5-9)$$

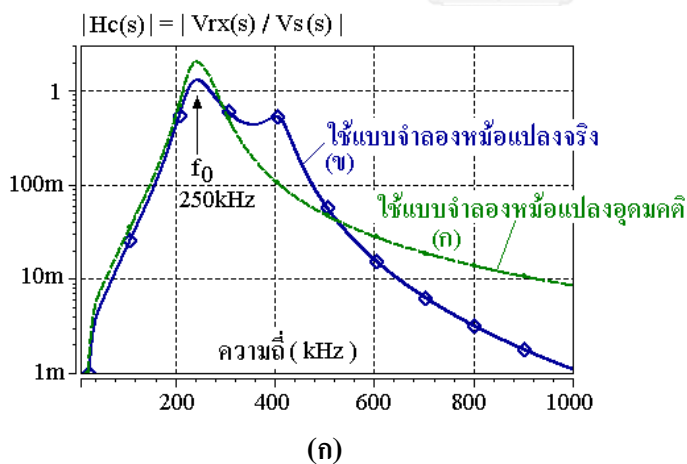
ซึ่งสมการที่ (5-9) นี้สามารถจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$C_1 = \frac{1}{\omega_0^2(L_1 + L_k)} \times \frac{\omega_0^2 L_k C_2 - 1}{\left(\omega_0^2 \frac{L_k L_1}{L_k + L_1} C_2 - 1 \right)} \quad (5-10)$$

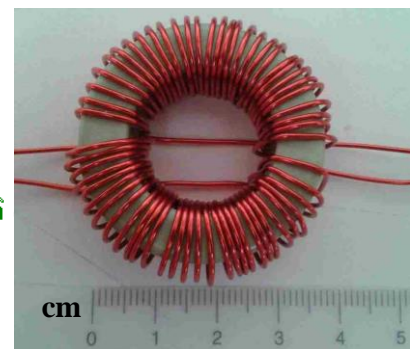
และเมื่อแทนสมการที่ (5-9) ลงในสมการที่ (5-8) ก็จะได้

$$V_{RX} = N \times I_p \times \frac{X_{C2}}{X_{C2} + X_{C1} + X_L} \times X_{C1} \quad (5-11)$$

ในกรณีที่หม้อแปลง T1 เป็นอุดมคติมี $k = 1$ หรือ $L_k = 0$ ค่าความเหนี่ยวนำของหม้อแปลง ทั้ง 2 ข้าง (L_p, L_s) เป็น 120 μ H เลือก $L_1 = 220\mu$ H และใช้คลื่นพาหะ (f_0) ที่ความถี่ 250 kHz ในการสื่อสาร เราจะสามารถใช้สมการที่ (5-6) และ (5-10) คำนวณค่า C_1 และ C_2 ได้เป็น 5.22 nF และ 1.84 nF ตามลำดับ กราฟ (ก) ในรูปที่ 5.5 (ก) แสดงผลการจำลองการทำงานของวงจรสื่อสารด้วยคลื่นพาหะที่นำเสนอมานผ่านแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 8 แผงซึ่งต่อกันแบบอนุกรม ด้วยเงื่อนไขที่แหล่งกำเนิดความถี่คลื่นพาหะ (V_s) ที่มีความต้านทาน 50 โอห์ม และโหลดของภาครับที่ V_{RX} เป็น 10k โอห์มโดยแกนอ่อนคือความถี่และแกนตั้งคือขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function), $|Hc(s)| = |V_{RX}/V_s|$ จาก V_s ของวงจรสื่อสารตัวใดตัวหนึ่งไปยัง $V_{RX}(n)$ ของวงจรสื่อสารตัวอื่นๆ



(ก)

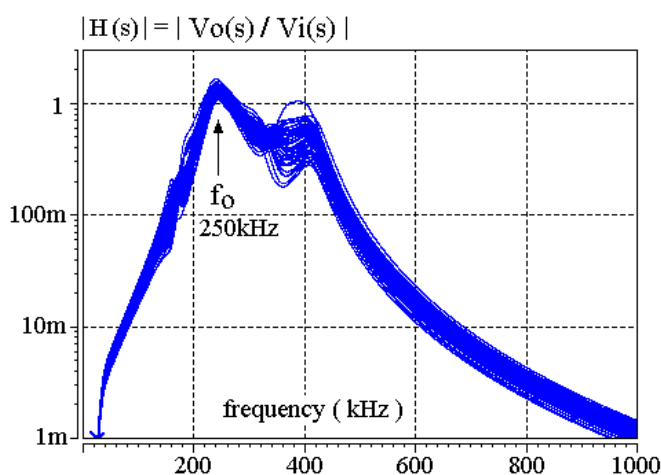


หม้อแปลงแบบ Toroid, CH358125
N1 = N2 = 30, AWG 22

(ข)

รูปที่ 5.5 ผลการจำลองการทำงานของวงจรสื่อสารด้วยคลื่นความถี่พาหะ
บนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 8 แผง ($n=8$)

สำหรับหม้อแปลงจริงใช้แกน Toroid เบอร์ CH358125 [34] พัน 30 รอบเท่าๆกันทั้งด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิด้วยลวดเบอร์ AWG 22 ดังรูปที่ 5.5 (ข) ถ้าเปิดด้านในด้านหนึ่งแล้ววัดอีกด้านหนึ่งจะได้ความเหนี่ยวนำ $L_p = L_s = 120 \mu\text{H}$ และมีค่าตัวประกอบคุณภาพ (quality factor, Q) เป็น 10 ที่ความถี่ 250 kHz ถ้าเชื่อมด้านใดด้านหนึ่งแล้ววัดอีกด้านหนึ่งจะได้ความเหนี่ยวนำ $L_k = 36 \mu\text{H}$ จากนั้นจึงใช้สมการที่ (5-1) ถึง (5-3) คำนวณค่าพารามิเตอร์อื่นๆของหม้อแปลงได้ $k = 0.836$, $L_m = 84 \mu\text{H}$, $N=1.195$ และถ้าเลือก $L_2 = 220 \mu\text{H}$ เราจะสามารถใช้สมการที่ (5-6) และ (5-10) คำนวณค่า C_1 และ C_2 ได้เป็น 5.22 nF และ 1.39 nF ตามลำดับเมื่อนำค่าที่วัดและคำนวณได้เหล่านี้มาจำลองการทำงานจะได้ผลการจำลองการทำงานดังกราฟ (ข) ในรูปที่ 5.5 (ก)

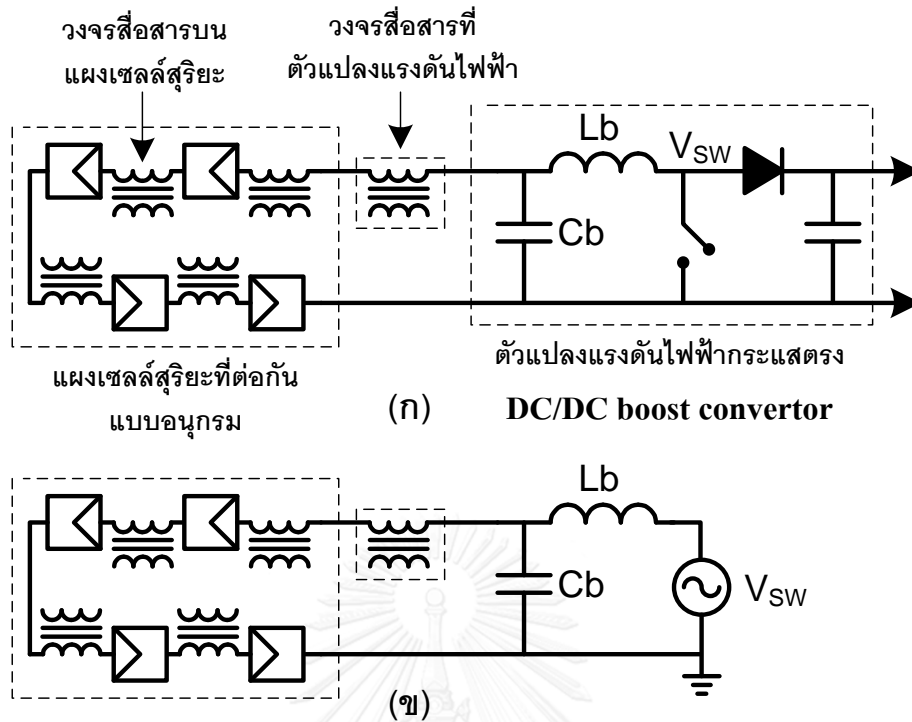


รูปที่ 5.6 ผลการจำลองการทำงานวิธีสุ่มค่าอุปกรณ์แบบ Monte Carlo [35]

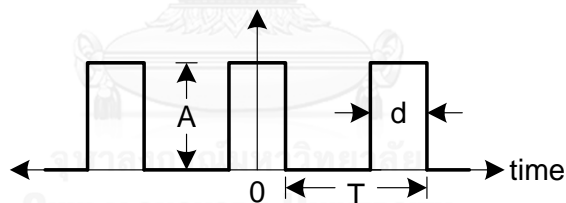
นอกจากนี้ ด้วยเงื่อนไขที่ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุต่างๆในวงจรสื่อสารบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละแผงมีความผิดพลาด 20% ที่ 3 sigma ของการกระจายแบบ Gaussian แล้วสุ่มค่าแบบอิสระจากกัน 50 ครั้งด้วยวิธี Monte Carlo [35] แล้วนำมาจำลองการทำงาน ก็ยังคงได้ฟังก์ชันถ่ายโอน $|H_c(s)| = |V_{rx}/V_s|$ ที่ยังคงใช้ได้ดังรูปที่ 5.6

5.3 วิเคราะห์สัญญาณรบกวนจากตัวแปลงแรงดันไฟฟ้าแบบสวิตซ์ซิ่ง

สำหรับการสื่อสารด้วยคลื่นพาหะนี้ สัญญาณรบกวนหลักน่าจะเกิดจากการสวิตซ์ซิ่งของตัวแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงดังรูปที่ 5.7 (ก) โดยสัญญาณที่โหนด V_{sw} จะมีลักษณะใกล้เคียงกับสัญญาณสี่เหลี่ยม (rectangular pulse train) ดังรูปที่ 5.8 ซึ่งสามารถแสดงทางคณิตศาสตร์ได้ด้วยอนุกรมฟูเรียร์ (Fourier series) [36] ดังสมการที่ (5-12)



รูปที่ 5.7 วงจรอย่างง่ายสำหรับประมาณขนาดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการสวิตซ์ซิ่งของตัวแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 5.8 สัญญาณสี่เหลี่ยม (rectangular pulse train) ที่โหนด V_{sw}

$$V_{sw}(t) = A \times \left[D + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(n\pi D) \cos(2n\pi f_{sw} t) \right] \quad (5-12)$$

โดยที่

$$D = \frac{d}{T}; \quad f_{sw} = \frac{1}{T}$$

จากสมการที่ (5-12) นิยามให้แอมพลิจูดของสัญญาณรูปไซน์ (Sinusoidal) คือ

$$V_{sw}(nf_{sw}) = \frac{2A}{n\pi} \sin(n\pi D) ; \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (5-13)$$

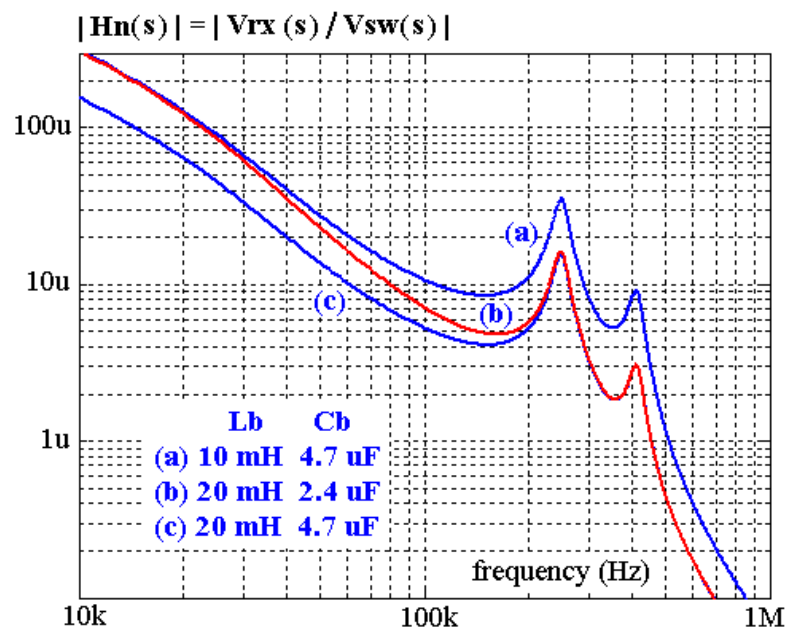
หากสมมติให้ การสวิตซ์ที่โหนด V_{sw} เกิดจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน V_{sw} ดังรูปที่ 5.7 (ข) ด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 8 แผงซึ่งต่อกันแบบอนุกรม รวมไปถึงการจำลองความไม่อุดมคติบางประการ อาทิเช่น L_b มี self-resonance ที่ 400 kHz, $Q = 20$ ที่ 100 kHz, C_b มี self-resonance ที่ 600 kHz เราสามารถจำลองการทำงานและได้ฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) $H_n(s)$ จาก

V_{SW} ไปยัง $V_{RX}(n)$ ของวงจรสื่อสารทุกๆตัวดังรูปที่ 5.9 และสามารถคำนวณขนาดสัญญาณรบกวนที่ฮาร์โมนิก (Harmonics) ที่ n ใดๆของสัญญาณสวิตซ์ซึ่งได้ด้วยสมการที่ (5-14) และขนาดสัญญาณรบกวนที่ $V_{RX}(n)$ ของวงจรสื่อสารทุกๆตัวด้วยสมการที่ (5-15)

$$|V_{SW}(nf_{sw})| = |Hn(nf_{sw})| \times |V_{SW}(nf_{sw})| \quad (5-14)$$

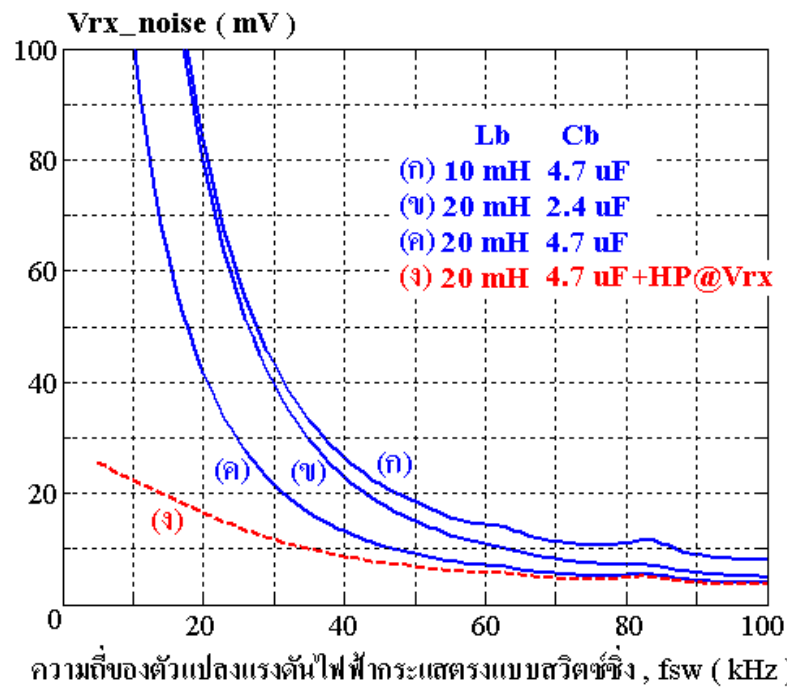
โดยที่ f_{sw} คือความถี่ของการสวิตซ์ และ $n = 1, 2, 3 \dots$

$$V_{RX\text{noise}} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} |V_{RX}(nf_{sw})|^2} \quad (5-15)$$

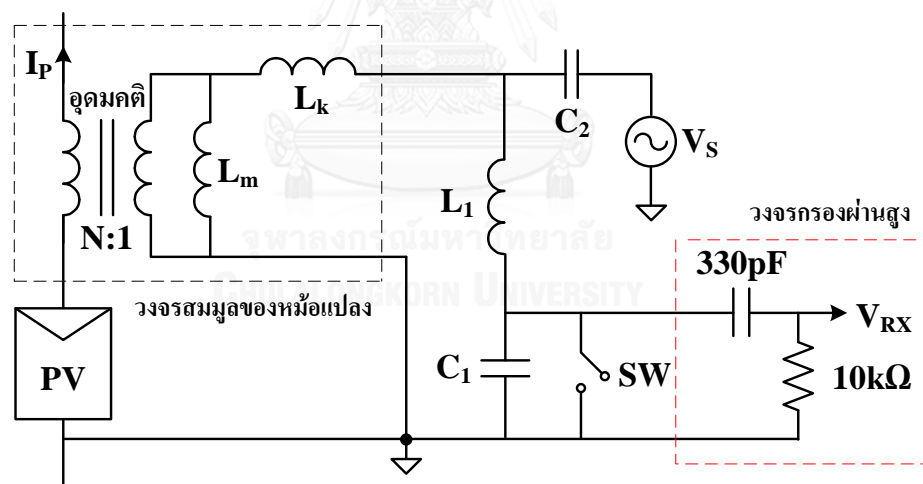


รูปที่ 5.9 ฟังก์ชันถ่ายโอน, $Hn(s)$, จาก V_{sw} ไปยัง $V_{rx}(n)$ ของวงจรสื่อสารทุกๆตัว

ที่แอมพลิจูดของสัญญาณสวิตซ์ซึ่ง $A = 1000$ โวลต์ เราสามารถคำนวณขนาดของ V_{rx_noise} ซึ่งแปรตามความถี่ของการสวิตซ์ได้ดังกราฟรูปที่ 5.10 กราฟ (ก) (ข) (ค) เป็นค่าสูงสุดของสัญญาณรบกวนที่สามารถคำนวณได้ (สมมติให้ $\sin(n\pi D)$ ในสมการที่ (5-13) มีค่าเป็น 1) และจากกราฟแสดงให้เห็นว่า ยิ่งใช้ค่า L_b และ C_b มากขึ้นเท่าไร ขนาดของสัญญาณรบกวนก็จะยิ่งน้อยลงไปเท่านั้น อีกทั้งความถี่การสวิตซ์ซึ่งยิ่งสูง ขนาดของสัญญาณรบกวนจะยิ่งน้อยลงไปอีกด้วย



รูปที่ 5.10 ขนาดของ V_{RX} noise ที่แอมพลิจูดของสัญญาณสวิตซ์ซิ่ง $A = 1000$ โวลต์



รูปที่ 5.11 วงจรสื่อสารและวงจรกรองผ่านความถี่สูงที่ภาครับสัญญาณ V_{RX}

ในทางปฏิบัติแล้วตัวแปลงแรงดันแบบสวิตซ์ซิ่งที่แปลงแรงดันสูงมากกว่า 100 โวลต์จะใช้ความถี่อยู่ประมาณ 5kHz – 20kHz เนื่องด้วยเหตุผลของการเลือกค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization) เพื่อให้เกิดความสูญเสีย (loss) น้อยที่สุด [37] ตัวอย่างเช่นการเพิ่มความถี่สวิตซ์ซิ่งจะลดความสูญเสียในตัวเหนี่ยวนำ L_b ลงแต่จะเพิ่มความสูญเสียในตัว MOSFET สวิตซ์ซิ่ง เป็นต้น ดังนั้นเพื่อที่จะลดสัญญาณรบกวนที่ความถี่สวิตซ์ซิ่งต่ำๆลง วงจรกรองผ่านความถี่สูงอย่างง่าย (CR high-pass filter) จึงถูกเพิ่มเข้าไปในวงจรสื่อสารดังรูปที่ 5.11 ซึ่งมันจะลดสัญญาณที่ความถี่ 250kHz ลงแค่เพียง 2%

แต่สามารถลดสัญญาณรบกวนที่ความถี่สวิทซ์ซึ่งต่ำๆลงได้อย่างมีประสิทธิภาพดังผลการคำนวณในรูปที่ 5.10 กราฟ (ง)

สุดท้ายนี้ ตัวอย่างการคำนวณสัญญาณรบกวนนี้แสดงให้เห็นว่าเราสามารถทำให้สัญญาณรบกวนที่ V_{RX} มีขนาดต่ำกว่า 50mV ได้ ซึ่งน้อยเพียงพอเมื่อเทียบกับ 1.2 โวลต์ของสัญญาณคลื่นพาหะที่ 250 kHz ดังผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 5.5 (ก) นอกจากนี้ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ดังรูปที่ 4.4 เป็นผลการทดลองจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Amorphous silicon เท่านั้น ยังมีเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอื่นๆอีกหลายแบบ ซึ่งความถี่ของสัญญาณคลื่นพาหะที่เหมาะสมในการสื่อสารอาจจะแตกต่างกันออกไป

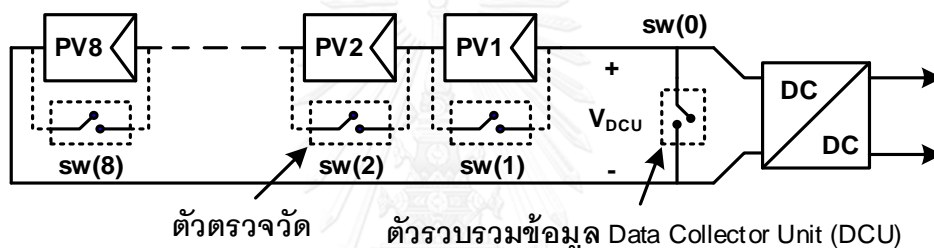


บทที่ 6

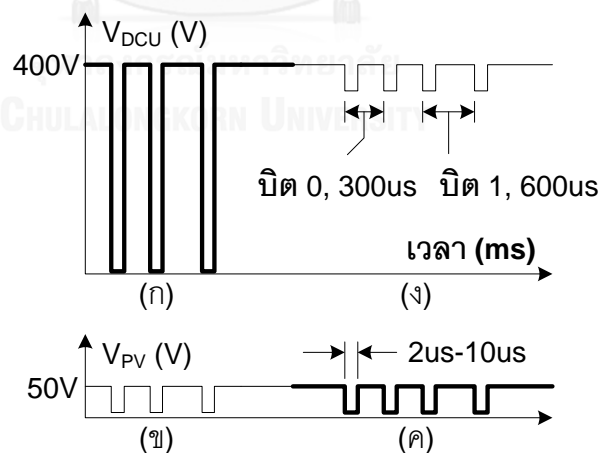
การสื่อสารผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลังด้วยสัญญาณพัลส์บนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อกันแบบอนุกรม

6.1 หลักการเบื้องต้น

ในอีกแนวคิดหนึ่ง กระทบขอนำเสนอการสื่อสารด้วยพัลส์ผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลัง ดังรูปที่ 6.1 สมมติให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ 8 แผงแต่ละแผงมีแรงดัน 50V ต่ออนุกรมกัน จะได้แรงดันอนุกรม 400V เข้าที่ตัวเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก (DC to DC boost convertor) แผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละแผงมีตัวตรวจวัดซึ่งภายในมีสวิตช์ sw(1), sw(2), ... , sw(N) คร่อมแผงเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ และที่ตัวเพิ่มแรงดันไฟฟ้าก็มีตัวรวบรวมข้อมูล (Data Collector Unit, DCU) ซึ่งภายในมีสวิตช์ sw(0) คร่อมสายส่งไฟฟ้ากำลังอยู่เช่นกัน



รูปที่ 6.1 การสื่อสารผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลังด้วยสัญญาณพัลส์บนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อกันแบบอนุกรม

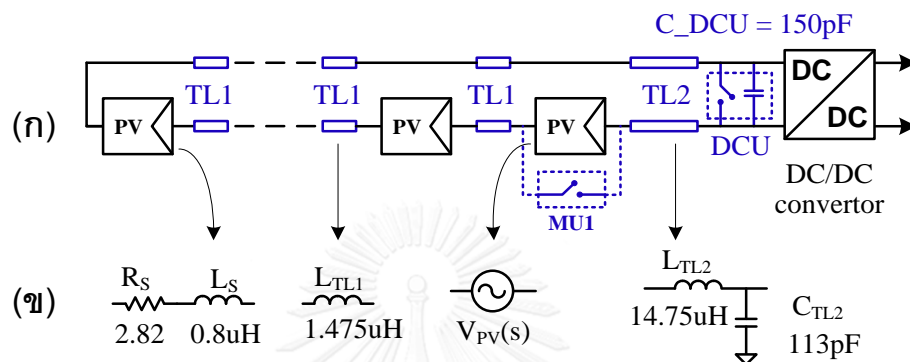


รูปที่ 6.2 สัญญาณพัลส์แบบอุดมคติของการสื่อสารผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลังด้วยสัญญาณพัลส์บนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อกันแบบอนุกรม

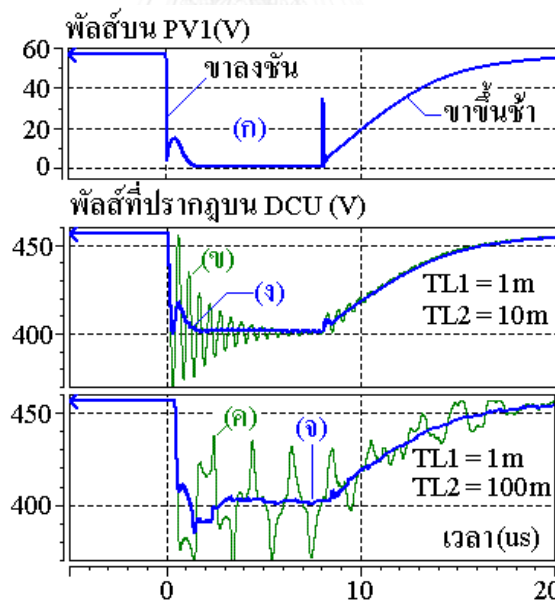
การสื่อสารเริ่มด้วยการเปิด (turn on) สวิตช์ sw(0) ทำให้แรงดัน V_{DCU} ให้เป็นศูนย์โวลต์เป็นพัลส์แคบๆ 5 μ S – 10 μ S ดังรูปที่ 6.2 (ก) ซึ่งเป็นผลให้แรงดันที่คร่อมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ V_{PV} ทุกๆ ตัวเป็นศูนย์ตามไปด้วยดังรูปที่ 6.2 (ข) ตัวตรวจวัดตัวใดตัวหนึ่งสามารถส่งข้อมูลไปให้ตัวรวบรวม

ข้อมูลได้โดยการเปิดสวิตช์ให้แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นเป็นศูนย์โวลต์เป็นพัลส์แคบๆ $5\mu\text{s} - 10\mu\text{s}$ ดังรูปที่ 6.2 (ค) ก็จะทำให้เกิดพัลส์ขนาด 50V ซึ่งเป็นแรงดันที่หายไปของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตัวนั้น ปรากฏที่ V_{DCU} ดังรูปที่ 6.2 (ง) และใช้วิธีง่ายๆ เพื่อแสดงบิต '0' และบิต '1' ด้วยระยะห่างระหว่างพัลส์ดังรูปที่ 6.2 (ง)

6.2 ความไม่อุดมคติของสัญญาณพัลส์



รูปที่ 6.3 การส่งพัลส์บนสายส่งไฟฟ้ากำลังที่มีความยาว TL1, TL2



รูปที่ 6.4 ผลการจำลองการทำงานเพื่อศึกษาความไม่อุดมคติของพัลส์บนสายส่งไฟฟ้ากำลังที่มีความยาว

เพื่อศึกษาความไม่อุดมคติของการส่งพัลส์บนสายส่งไฟฟ้ากำลังที่มีความยาว จึงจำลองการทำงาน (Simulate) ด้วยวงจรตัวอย่างดังรูปที่ 6.3 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งใช้วงจรจำลองในบทที่ 4 แต่ละแผงวางห่างกัน 1 เมตรด้วยสายส่ง TL1 และตัวรวบรวมข้อมูล (DCU) ที่ติดอยู่กับตัวเพิ่ม

แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง อยู่ห่างจากแถวของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV string) 10 เมตรด้วยสายส่ง TL2 สายส่งสำหรับจำลองการทำงานนี้เป็นแบบ twin lead transmission line [38] ซึ่งใช้สายทองแดงคู่หนึ่งที่มีรัศมี (r) 1 mm วางห่างกัน (D) 4 cm อยู่ในฉนวนไฟฟ้าที่มีค่า relative permittivity $\epsilon_r = 1.5$ โดยสายส่งจำลองนี้จะมีค่าความจุต่อเมตร (C_{TL}) ค่าความเหนี่ยวนำต่อเมตร (L_{TL}) characteristic impedance (Z_0) และความเร็วของคลื่น ดังนี้

$$C_{TL} = \pi\epsilon / \ln \left(\frac{D + \sqrt{D^2 - r^2}}{r} \right) = 11.3 \text{pF / meter} \quad (6-1)$$

$$L_{TL} = \frac{\mu}{\pi} \ln \left(\frac{D + \sqrt{D^2 - r^2}}{r} \right) = 1.475 \text{uH / meter} \quad (6-2)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_{TL}}{C_{TL}}} \approx \frac{120}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left(\frac{D + \sqrt{D^2 - r^2}}{r} \right) = 361 \ \Omega \quad (6-3)$$

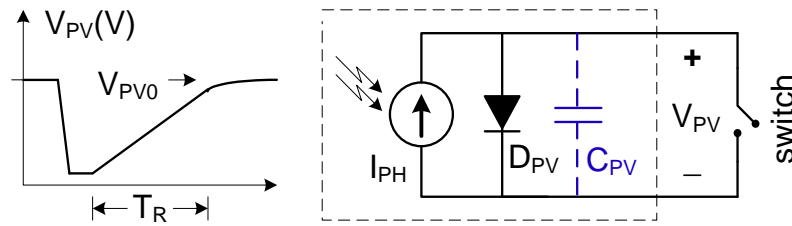
$$v = \sqrt{\frac{1}{\mu\epsilon}} = 245 \times 10^6 \ \text{m / s} \quad (6-4)$$

เมื่อสวิตช์ซึ่งคร่อม PV1 เปิด (turn on) ประมาณ 8uS จะได้ผลการจำลองการทำงานดังรูปที่ 6.4 กราฟ (ก) ซึ่งมีขอบขาลงที่ชันมาก ขอบขาลงที่ชันนี้จะไปปรากฏที่ตัวรวบรวมข้อมูล (DCU) ดังรูปที่ 6.4 กราฟ (ข) ซึ่งมีการสั่นที่ขอบขาลงด้วยความถี่ 1.9 MHz และถ้าความยาวของสายส่ง TL2 เป็น 100 เมตรจะได้ผลการจำลองการทำงานดังรูปที่ 6.4 กราฟ (ค)

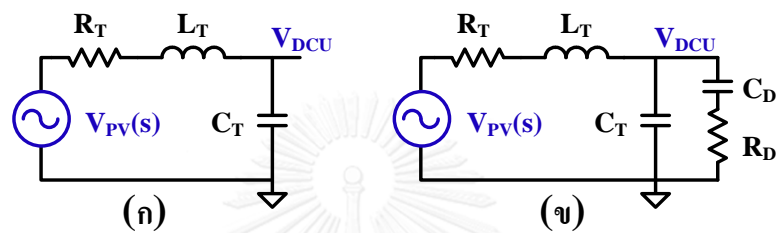
หลังจากปิดสวิตช์ (turn off) สัญญาณพัลส์ทั้ง V_{PV1} และ V_{DCU} จะขึ้นอย่างช้าๆ เนื่องจากกระแส I_{PH} (photo current) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ PV1 จะไหลเข้าไปสะสม (charge) ในตัวเก็บประจุซึ่งเกิดจากลักษณะทางกายภาพของรอยต่อพีเอ็นในเซลล์แสงอาทิตย์ดังที่กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4 และถูกนำมาแสดงใหม่เพื่อความสะดวกในการอธิบายดังรูปที่ 6.5 โดยที่ค่า C_{PV} จะถูกประมาณให้เท่ากับ depletion capacitance C_J ในตารางที่ 4.1 และช่วงเวลาของการขึ้นอย่างช้าๆนี้ (T_R) สามารถประมาณอย่างคร่าวๆได้ด้วยสมการการชาร์จประจุที่ (6-5)

$$T_R = V_{PV0} \times C_{PV} / I_{PH} \quad (6-5)$$

ในกรณีที่แสงแดดแรงหรือกระแส I_{PH} มากเวลาขาขึ้นของสัญญาณพัลส์นี้จะสั้นเพียงแค่ว่า 10uS ดังรูปที่ 6.4 แต่ในกรณีที่แสงแดดอ่อนหรือกระแส I_{PH} น้อยเวลาขาขึ้นของสัญญาณพัลส์นี้อาจจะยาวถึง 300uS ($50V \times 92.5\text{pF} / 15\text{mA}$) ดังผลการทดลองดังรูปที่ 6.15 และรูปที่ 6.16 ท้ายบท และรูปที่ 8.10 (ข) ในบทที่ 8 ความช้าของขอบขาขึ้นนี้ (T_R) เป็นปัจจัยหลักในการกำหนดความเร็วของการสื่อสารข้อมูล



รูปที่ 6.5 แบบจำลองอย่างง่ายของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อสาธิตความช้าของสัญญาณพัลส์ที่ขอบขาขึ้น



รูปที่ 6.6 วงจรอย่างง่ายของรูปที่ 6.3(ก) เพื่อศึกษาปรากฏการณ์สั้นที่ความถี่สูง

เพื่อศึกษาปรากฏการณ์สั้นที่ความถี่สูงที่ขอบขาของสัญญาณพัลส์เราจะเริ่มการประมาณอย่างง่ายโดยถ้าความถี่ที่สั้น 1.9 MHz มีความเร็วของคลื่นดังสมการที่ (6-4) เราจะได้ความยาวของคลื่นในสายส่งนี้เป็น $\lambda = v/f = 129$ เมตร ถ้าสายส่ง TL2 นี้ยาวแค่ 10 เมตรซึ่งเล็กกว่าความยาวคลื่นมาก เราก็สามารถประมาณสายส่งนี้ให้ง่ายลงดังรูปที่ 6.3 (ข) TL1 ประมาณเป็นตัวเหนี่ยวนำด้วยสมการที่ (6-2) ได้ $L_{TL1} = 1.475 \mu\text{H}$, TL2 ประมาณด้วยสมการที่ (6-1) และ (6-2) เป็นตัวเหนี่ยวนำ $L_{TL2} = 14.75 \mu\text{H}$ และตัวเก็บประจุ $C_{TL2} = 113 \text{ pF}$ วงจรจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่ 4.1 (ก) ประมาณให้เหลือเพียง R_S และ L_S ส่วนที่ตัวรวบรวมข้อมูล (DCU) ซึ่งมีวงจรสื่อสารคร่อมสายส่งไฟฟ้ากำลังอยู่ก็จะถูกแทนด้วย C_{DCU} ตัวเก็บประจุขนาด 150pF เพื่อเป็นตัวแทนของวงจรสื่อสารนั้นสำหรับแหล่งกำเนิดพัลส์ PV1 ก็ถูกแทนเป็นแหล่งจ่ายแรงดัน $V_{PV}(s)$ ฉะนั้นวงจรอย่างง่ายที่ได้จึงเหลือเพียงวงจรอนุกรมของ L_T , C_T , R_T ดังรูปที่ 6.5 (ก) ซึ่งมีค่าดังนี้

$$L_T = 7 \times L_S + 7 \times L_{TL1} + L_{TL2} = 30.675 \mu\text{H} \quad (6-5)$$

$$C_T = C_{TL2} + C_{DCU} = 263 \text{ pF} \quad (6-6)$$

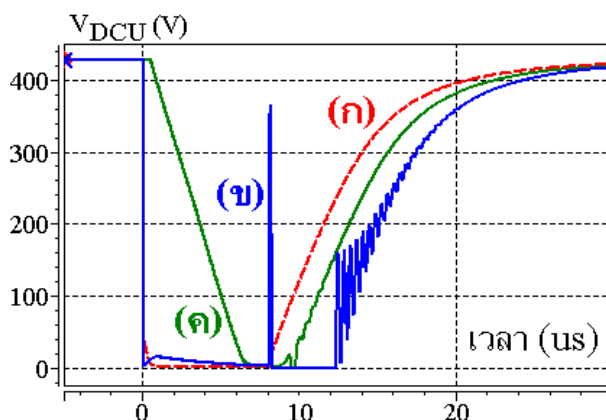
$$R_T = 7 \times R_S = 19.74 \Omega \quad (6-7)$$

และวงจรในรูปที่ 6.5 (ก) นี้จะ resonance ที่

$$f_{\text{resonance}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_T C_T}} = 1.77 \text{ MHz} \quad (6-8)$$

ซึ่งใกล้เคียงกับความถี่ของการสั่นในรูปที่ 6.4 กราฟ (ข)

สำหรับการส่งพัลส์จากตัวแม่ (DCU) ไปยังตัวลูก ในกรณีที่การจำลองการทำงานไม่มีสายส่งไฟฟ้ากำลัง TL1, TL2 และตัวเหนี่ยวนำ L_S ในวงจรจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์รูปที่ 4.1 (ก) พัลส์ที่สร้างจากตัว DCU จะเป็นดังรูปที่ 6.7 (ก) ซึ่งแรงดัน V_{DCU} ลดลงทันทีเมื่อเปิดสวิตช์ และหลังจากปิดสวิตช์แรงดัน V_{DCU} จะขึ้นอย่างช้าๆจากการประจุตัวเก็บประจุ C_J ด้วย I_{PH} ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทุกๆแผงและเมื่อเพิ่มแบบจำลองสายส่งไฟฟ้ากำลัง TL1, TL2 และตัวเหนี่ยวนำ L_S เข้าในในการจำลองการทำงานพัลส์ที่เกิดขึ้นบนตัวแม่ (DCU) จะเป็นดังรูปที่ 6.7 (ข) (หรือจากการทดลองจริงดังรูปที่ 6.16 (ก)) ซึ่งแตกต่างกับรูปที่ 6.7 (ก)



รูปที่ 6.7 ผลการจำลองการทำงานของสัญญาณพัลส์ที่สร้างจากตัว DCU

(ก) กรณีที่แบบจำลองไม่มี TL1, TL2 และ L_S ในวงจรจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์

(ข) กรณีที่แบบจำลองมี TL1, TL2 และ L_S ในวงจรจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์

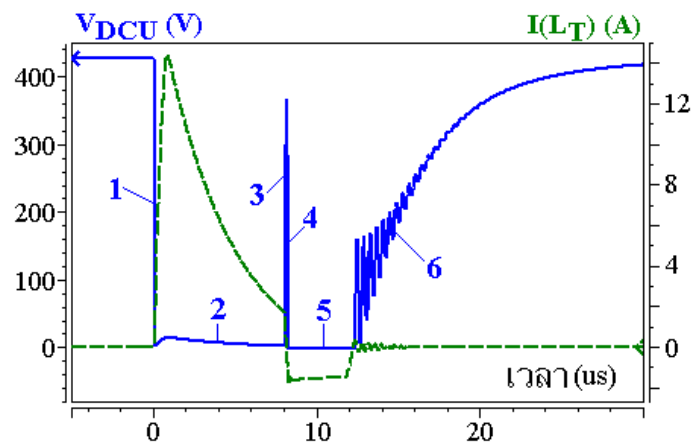
(ค) เหมือนกรณี (ข) และสัญญาณพัลส์ที่สร้างจากตัว DCU ใช้วงจรสวิตช์แบบเปิดเข้า

เพื่อที่จะอธิบายกลไกความไม่อุดมคติของพัลส์นี้ เราจะแบ่งพัลส์รูปที่ 6.7 (ข) ออกเป็น 6 ขั้นตอนดังรูปที่ 6.8 ซึ่งมีกลไกการไหลของกระแสชั่วคราว $I(L_T)$ (transient current) ผ่านอุปกรณ์ต่างๆดังวงจรอย่างง่ายในรูปที่ 6.9 ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

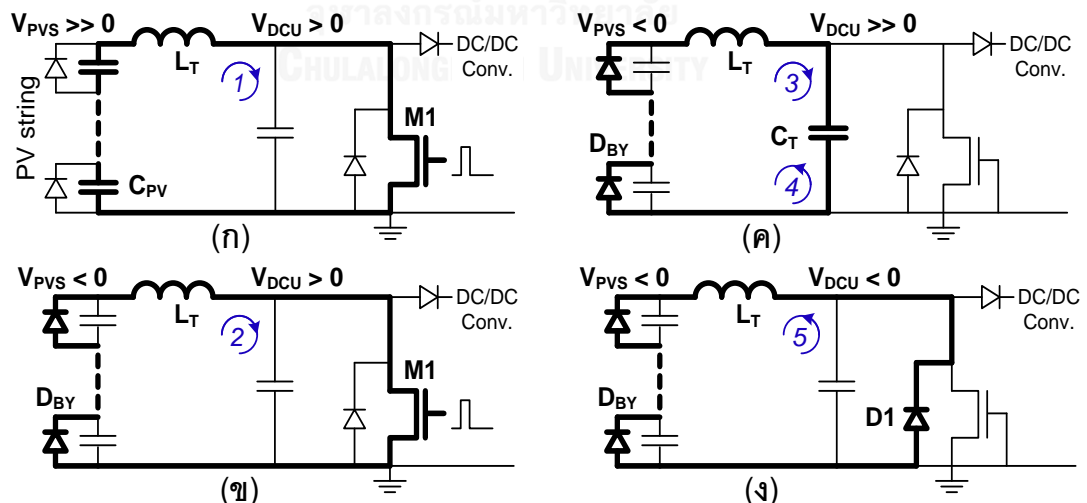
1. เมื่อสวิตช์ M1 ที่ DCU ถูกเปิด (turned on) ประจุในตัวเก็บประจุของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (C_{PV}) ทุกๆแผงจะถูกปล่อยออกอย่างรวดเร็ว (discharge) ผ่านทาง L_T ดังรูปที่ 6.9 (ก)
2. หลังจากที่ประจุใน C_{PV} ถูกปล่อยออกหมดแล้ว กระแส $I(L_T)$ ใน L_T ยังคงมีความเฉื่อยจึงไม่สามารถหยุดได้ทันที มันยังคงไหลต่อไปผ่านทาง bypass diode (D_{BY}) ดังรูปที่ 6.9 (ข) โดยไดโอดเหล่านี้จะถูกติดเพิ่มบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทุกๆแผงเพื่อเป็นทางผ่านของกระแสในกรณีที่แผงนั้นเสียหายหรือกระแสไม่สามารถไหลผ่านแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างปกติ

และในกรณีนี้สวิตช์ M1 ถูกเปิดไม่นานนัก กระแส $I(L_T)$ จะยังคงไหลผ่าน D_{BY} จนกระทั่ง สวิตช์ M1 ถูกปิด

- หลังจากที่สวิตช์ถูกปิดอย่างทันทีทันใด กระแส $I(L_T)$ จะไหลเข้าสู่ C_T จนกระทั่ง $I(L_T)$ ลดลง เป็นศูนย์ดังรูปที่ 6.9 (ค) หรือก็คือพลังงานใน L_T ได้ถูกถ่ายไปยัง C_T แบบทันทีทันใด จึงเกิด glitch ขึ้นบน V_{DCU} ดังรูปที่ 6.8
- จากนั้นพลังงานใน C_T ก็จะถ่ายกลับไปยัง L_T จนกระทั่ง V_{DCU} ลดลงเป็นศูนย์อีกครั้งหนึ่ง และทิศของกระแส $I(L_T)$ ก็ได้ไหลกลับทิศแล้วดังรูปที่ 6.9 (ค)



รูปที่ 6.8 ผลการจำลองการทำงานของสัญญาณของสัญญาณพัลส์ที่สร้างจากตัว DCU ในกรณีที่แบบจำลองมี $TL1$, $TL2$ และ L_S ในวงจรจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 6.9 รูปแสดงกลไกการเกิดการเกิดพัลส์คร่อมตัว DCU ในรูปที่ 6.8

- เป็นที่รู้กันว่า ถ้ากระแสในไดโอดใดๆหยุดไหลกระทันหัน ประจุในรอยต่อพีเอ็นของไดโอดจะสร้าง กระแสไหลกลับ (reverse recovery current) ในทิศทางตรงข้ามในทันที ซึ่งช่วงเวลานี้จะถูก

เรียกว่า reverse recovery time ของไดโอด [39] โดยกระแสไหลกลับของ D_{BY} (1N5402) นี้จะไหลผ่าน L_T และเปิดไดโอด $D1$ ซึ่งอยู่ภายใน MOSFET สวิตช์ $M1$ ดังรูปที่ 6.9 (ง) ดังนั้นระยะเวลาในขั้นที่ 5 นี้จึงขึ้นอยู่กับ reverse recovery time ของ D_{BY} (bypass diode)

- หลังจากประจุที่สะสมในรอยต่อพีเอ็นของ bypass diode หมดแล้ว แรงดัน V_{DCU} จะขึ้นอย่างช้าๆจากการชาร์จตัวเก็บประจุ C_{PV} ด้วย I_{PH} ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทุกแผง

6.3 วิธีแก้การสั่นของสัญญาณพัลส์ด้วยการใส่โหลดที่ปลายสายส่ง

ในกรณีที่สายส่งไฟฟ้ากำลังนี้มีความยาวมากกว่า $\lambda/2\pi$ การประมาณให้สายส่งเป็นตัวเหนี่ยวนำดังหัวข้อที่ 6.2 จะไม่ถูกต้อง การสั่นจะเกิดจากการสะท้อนไปกลับของคลื่นภายในสายส่งจากทฤษฎีการสะท้อนของคลื่น [40] ซึ่งแสดงด้วยสัมประสิทธิ์การสะท้อน Γ_0 ดังสมการที่ (6-9) จะพบว่าถ้าทำให้โหลดที่ปลายสายส่งมีความต้านทาน (resistance, Z_L) เท่ากับ characteristic impedance (Z_0) ได้สัมประสิทธิ์การสะท้อนจะเป็นศูนย์หรือก็คือจะไม่มีการสะท้อนของคลื่นนั่นเอง

$$\Gamma_0 = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (6-9)$$

ดังนั้นวิธีแรกสำหรับลดการสั่นที่ขอบขาหลังก็คือการเพิ่มความต้านทาน $R_D = Z_0 = 360 \Omega$ ดังสมการที่ (6-3) เข้าไปคร่อมสายส่งไฟฟ้ากำลังที่ตัวรวบรวมข้อมูล (DCU) ดังรูปที่ 6.6 (ข) เพื่อลดการสะท้อนกลับของคลื่น ส่วน $C_D = 2.2\text{nF}$ นั้นใช้ป้องกันไฟฟ้ากระแสตรงไหลเข้าไปสูญเสียใน R_D และสุดท้ายนี้ผลการจำลองการทำงานที่ $TL2 = 10$ เมตรจะได้แรงดันคร่อม DCU เป็นดังกราฟรูปที่ 6.4 (ง) และที่ $TL2 = 100$ เมตรจะได้แรงดันคร่อม DCU เป็นดังกราฟรูปที่ 6.4 (จ) ซึ่งลดผลการสั่นลงได้อย่างเห็นได้ชัด ยิ่งไปกว่านั้นถ้าลองเปลี่ยนค่า R_D เป็น 180Ω หรือ 720Ω ก็ยังคงลดการสั่นได้อย่างเห็นผลเช่นกัน

เนื่องด้วยค่า Z_0 ดังสมการที่ (6-3) นั้นแปรตามระยะห่างระหว่างคู่สายส่ง (D) และค่า relative permittivity ϵ_r ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพแวดล้อมที่คู่สายส่งผ่าน อาทิเช่น พื้นดินแห้ง พื้นดินเปียก อากาศ รางเหล็ก หรือมีคู่สายอื่นอยู่ใกล้เคียง เป็นต้น ดังนั้นค่า Z_0 ของสายส่งจึงไม่คงที่ในทางปฏิบัติ

6.4 วิธีแก้การสั่นของสัญญาณพัลส์ด้วยวงจรสวิตช์แบบเปิดเข้า

ในอีกมุมมองหนึ่ง การสั่นของสัญญาณพัลส์นั้นเกิดจากขอบขาหลังของสัญญาณพัลส์ที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วนั้นมี Harmonics ของสัญญาณความถี่สูงอยู่มาก ตัวอย่างเช่นสัญญาณสี่เหลี่ยม (pulse) ในรูปที่ 6.10 (ก) จะมีส่วนประกอบความถี่สูงมากกว่าและสัญญาณสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal pulse) ในรูปที่ 6.10 (ข) ดังกราฟขอบเขตสเปกตรัม [41] (spectral bounds) ในรูป

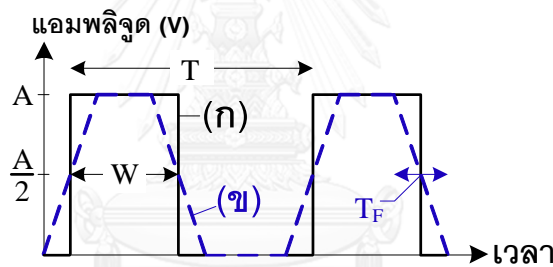
ที่ 6.11 (ก) และ (ข) ตามลำดับ และจากกราฟนี้ ในกรณีที่ความถี่ของการสั่น f_{RING} สูงกว่าจุดหักมุมที่สองของขอบเขตสเปกตรัม (ข) f_F เราจะสามารถประมาณส่วนประกอบที่ความถี่ f_{RING} ของสัญญาณสี่เหลี่ยมและสัญญาณสี่เหลี่ยมคางหมูได้ดังสมการที่ (6-10) และ (6-11) ตามลำดับ

$$V_P(f_{RING}, dBV) = A_0 - 20 \log f_{RING} / f_W \tag{6-10}$$

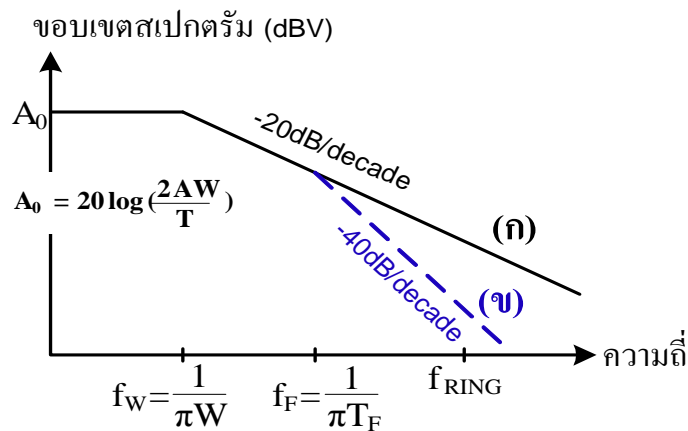
$$V_{TP}(f_{RING}, dBV) = A_0 - 20 \log \left(\frac{f_F}{f_W} \right) - 40 \log \left(\frac{f_{RING}}{f_F} \right) \tag{6-11}$$

เมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณสี่เหลี่ยม สัญญาณสี่เหลี่ยมคางหมูจะมีขนาดสัญญาณที่ความถี่ f_{RING} ลดลงแบบสัมพัทธ์ดังสมการที่ (6-12) ตัวอย่างเช่นถ้า $f_{RING} = 1.9$ MHz และสัญญาณสี่เหลี่ยมคางหมูมี $T_F = 4$ μ S สัญญาณสี่เหลี่ยมคางหมูจะมีขนาดสัญญาณที่ความถี่ f_{RING} น้อยกว่าสัญญาณสี่เหลี่ยมถึง 23.8 เท่า เป็นต้น

$$\frac{V_P(f_{RING}, V)}{V_{TP}(f_{RING}, V)} = \frac{f_{RING}}{f_F} = f_{RING} \pi T_F \tag{6-12}$$

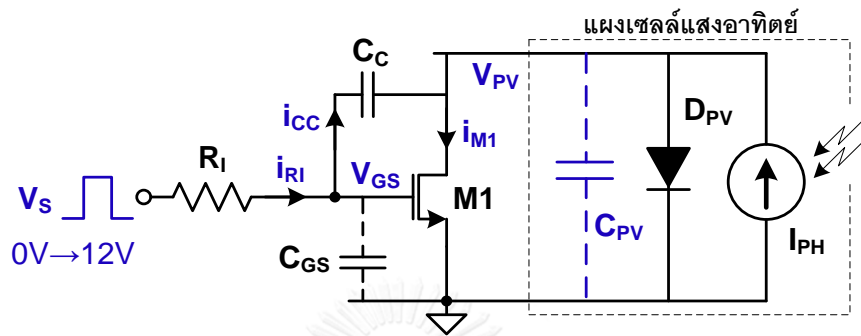


รูปที่ 6.10 (ก) สัญญาณสี่เหลี่ยม (pulse) (ข) สัญญาณสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal pulse) ซึ่งมีขอบเขตสเปกตรัม [41] (spectral bounds) ดังรูปที่ 6.11 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

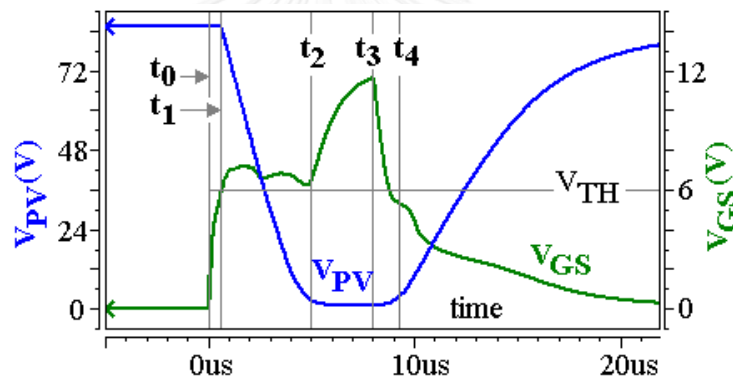


รูปที่ 6.11 ขอบเขตสเปกตรัม [41] (spectral bounds) ของ (ก) สัญญาณสี่เหลี่ยม (ข) สัญญาณสี่เหลี่ยมคางหมู

ฉะนั้น วิธีที่สองสำหรับลดการสั้นที่ขอบขาลงของสัญญาณพัลส์ก็คือ การสร้างพัลส์ที่มีขอบขาลงช้าๆ ด้วยสวิตช์ที่ค่อยๆ เปลี่ยนความต้านทานจากสถานะปิดไปสถานะเปิด วงจรของสวิตช์นี้ [42-44] ได้ถูกแสดงดังรูปที่ 6.12 NMOS ทรานซิสเตอร์ M1 ทำงานเป็นสวิตช์โดยมี R_I และ C_C ช่วยทำให้การเปิดสวิตช์ช้าลง ส่วน C_{GS} คือค่าความจุที่เกตของ NMOS สวิตช์ M1



รูปที่ 6.12 วงจรสวิตช์ที่เปิดอย่างช้าๆ เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ที่มีขอบขาลงช้า



รูปที่ 6.13 ผลการจำลองทำงานของวงจรสวิตช์รูปที่ 6.12

ด้วยค่า R_I 1.5k โอห์ม และ C_C 150pF วงจรสวิตช์รูปที่ 6.12 นี้มีผลการจำลองทำงานดังกราฟรูปที่ 6.13 โดยที่แกนตั้งฝั่งซ้ายเป็นขนาดของแรงดันตกคร่อมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ V_{PV} ซึ่งมีขอบขาลงช้าประมาณ 4us ส่วนแกนตั้งฝั่งขวาเป็นขนาดของแรงดันที่โหนด V_{GS} การอธิบายการทำงานของวงจรเริ่มด้วยการสมมติให้ V_S เป็นศูนย์ยาวนานเพียงพอที่ V_{GS} เป็นศูนย์ หรือสวิตช์ M1 ปิดและ V_{PV} เป็น 85 โวลต์ จากนั้นที่เวลา t_0 V_S เปลี่ยนจาก 0 โวลต์เป็น 12 โวลต์ทันที V_{GS} จะขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียลด้วยค่าคงที่ทางเวลา (time constant) $= R_I(C_C + C_{GS})$ จนถึงเวลา t_1 ซึ่ง V_{GS} ขึ้นสูงมากพอที่กระแส I_{M1} มากกว่า I_{PH} (Photo current) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แรงดันตกคร่อมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ V_{PV} ก็ จะเริ่มตกลง ณ ช่วงเวลานี้เราสามารถเขียนความสัมพันธ์จากวงจรรูปที่ 6.12 ได้ดังนี้

$$i_{RI} = \frac{V_S - V_{GS}}{R_I} \quad (6-13)$$

$$i_{CC} = C_C \frac{d(V_{GS} - V_{PV})}{dt} \quad (6-14)$$

ในขณะที่ V_{GS} เพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ I_{M1} ก็จะมากขึ้นเรื่อยๆ และ V_{PV} ก็จะตกลงเร็วขึ้น ซึ่งเป็นผลให้ i_{CC} เพิ่มขึ้นด้วย จนกระทั่ง i_{CC} มากเท่ากับ i_{RI} กระแสที่ไหลเข้า C_{GS} ก็จะเป็นศูนย์หรือ V_{GS} จะไม่เพิ่มขึ้น ($dV_{GS}/dt = 0$) ตั้งช่วงเวลา t_1 ถึง t_2 ในรูปที่ 6.13 และด้วยเงื่อนไขความสมดุลนี้ ($i_{CC} = i_{RI}$ และ $dV_{GS}/dt = 0$) ร่วมกับสมการ (6-13) และ (6-14) เราจะสามารถหาความชันของ V_{PV} ในช่วงเวลาสมดุลนี้ได้ดังสมการที่ (6-15)

$$-\frac{dV_{PV}}{dt} = \frac{V_S - V_{GS}}{C_C R_I} \quad (6-15)$$

และสามารถหาช่วงเวลาขาลงของสัญญาณพัลส์ได้ดังนี้

$$T_F = t_2 - t_1 \approx \Delta V_{PV} \times \left| -\frac{dt}{dV_{PV}} \right| = \Delta V_{PV} \times \frac{C_C R_I}{V_S - V_{GS}} \quad (6-16)$$

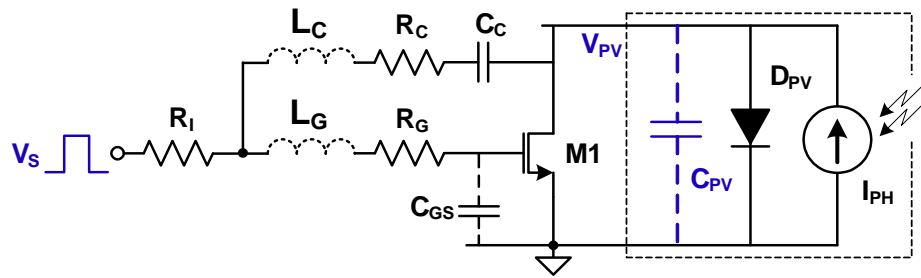
ช่วงเวลาขาลงของสัญญาณพัลส์ (T_F) สามารถปรับได้ด้วยการเลือกค่า R_I และ C_C ตัวอย่างเช่น ถ้า $\Delta V_{PV} = 85V$, $V_S = 12V$, $V_{GS} \sim 6V$, $R_I = 1.5k\Omega$, $C_C = 150pF$ จะได้ T_F จากสมการที่ (6-16) = 3.2 μS ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองการทำงานดังรูปที่ 6.13

ที่เวลา t_3 V_S เปลี่ยนจาก 12 โวลต์เป็น 0 โวลต์ทันทีเพื่อจะปิดสวิตช์ V_{GS} จะลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลด้วยค่าคงที่ทางเวลา (time constant) = $R_I(C_C + C_{GS})$ จนกระทั่งถึง t_4 ซึ่งเป็นจุดที่กระแส I_{M1} เริ่มน้อยกว่า I_{PH} (Photo current) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แรงดันตกคร่อมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ V_{PV} ก็จะเริ่มเพิ่มขึ้น ซึ่งมีการอัตราการเพิ่มขึ้นประมาณ

$$\frac{dV_{PV}}{dt} \approx \frac{I_{PH}}{C_{PV}} \quad (6-17)$$

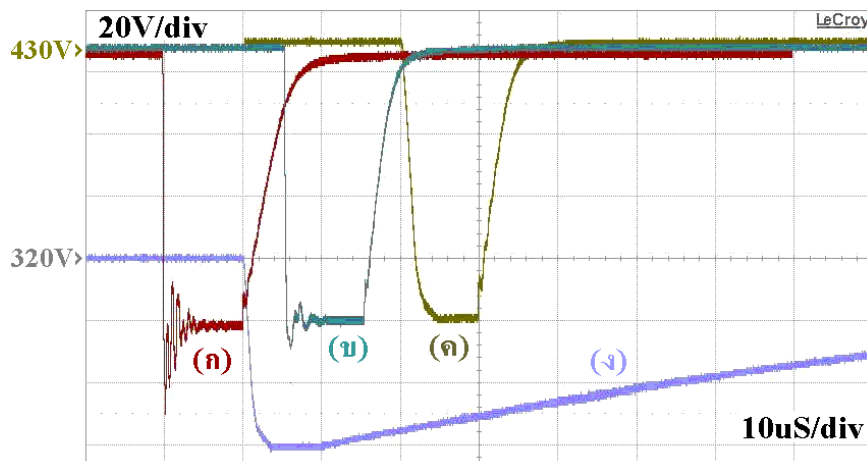
ซึ่งโดยปกติแล้วอัตราการเพิ่มขึ้นของ V_{PV} นี้จะชันมากไม่พอที่ทำให้เกิดเงื่อนไขความสมดุล $i_{CC} = i_{RI}$ เหมือนตอนขาลงดังนั้น V_{GS} จึงตกลงเรื่อยๆดังแสดงในกราฟรูปที่ 6.13 ฉะนั้นแล้ว R_I และ C_C จึงไม่ค่อยมีผลกับขาขึ้นของสัญญาณพัลส์มากนัก

หลังจากการทดลองนำวงจรสวิตช์ที่เปิดอย่างช้าๆนี้ไปใช้จริงก็พบการสั่น (Oscillation) ทั้งที่ขอบขาขึ้นและขาลงของสัญญาณพัลส์ ดังนั้นจึงได้ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรซึ่งจะกล่าวถึงในรายละเอียดในบทที่ 7 โดยผลจากการวิเคราะห์ที่ได้พบพบว่าตัวเหนี่ยวนำค่าเล็กน้อยประมาณ 20nH ซึ่งเกิดจากสายเชื่อมต่ออุปกรณ์ที่ยาวดังเช่น L_C หรือ L_G ในรูปที่ 6.14 สามารถทำให้เกิดการสั่นที่ขอบขาขึ้นและขาลงของสัญญาณพัลส์แต่ก็สามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่ม R_C หรือ R_G เข้าไปดังรูป



รูปที่ 6.14 แสดงตำแหน่งของ R_C หรือ R_G แก่การสั่นของวงจรสวิตช์ที่เปิดอย่างช้าๆ

6.5 ผลการทดลองสร้างสัญญาณพัลส์



รูปที่ 6.15 สัญญาณพัลส์จริง คร่อมตัวรวบรวมข้อมูล (DCU) แบบต่างๆเมื่อสัญญาณพัลส์ ถูกสร้างจากตัวตรวจวัดบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์อันหนึ่ง

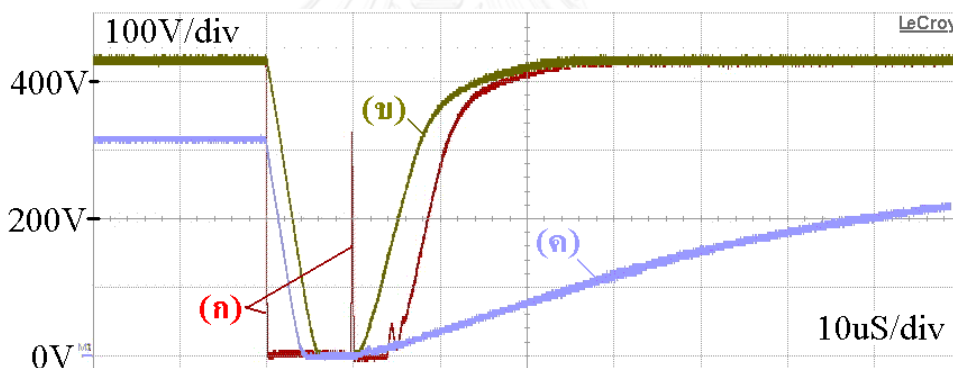
สำหรับการทดลองสร้างสัญญาณพัลส์ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Amorphous silicon ขนาด 50 วัตต์ 5 แผงถูกนำมาต่อกันแบบอนุกรม แต่ละแผงมีแรงดันขณะไม่มีโหลด (open circuit voltage, V_{OC}) และกระแสขณะลัดวงจร (short circuit current, I_{SC}) ที่ความเข้มแสง 1000 W/m^2 เป็น 93.4V และ 860mA ตามลำดับ และมีสายส่งไฟฟ้ากำลังต่อจาก 5 แผงนี้ไปยังตัวรวบรวมข้อมูล (DCU) ยาว 8 เมตร เมื่อสัญญาณพัลส์ถูกสร้างจากตัวตรวจวัดบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์อันหนึ่ง จะได้สัญญาณพัลส์ไปปรากฏที่ DCU เป็นดังรูปที่ 6.15 โดยที่

- พัลส์รูป (ก) เป็นพัลส์ที่สร้างจาก MOSFET สวิตช์ (IRFS630) ภายใต้แสงแดดจัด (V_{OC} และ I_{SC} ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แผงหนึ่งเป็น 86V และ 690mA) ซึ่งเป็นพัลส์ที่มีขอบขาลงชันมากและมีการสั่นเกิดขึ้น เป็นดังผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 6.4 (ข)
- พัลส์รูป (ข) ใช้วิธีแก้การสั่นของสัญญาณพัลส์ด้วยการใส่โหลดที่ DCU ด้วย $R_D 410\Omega$ และ $C_D 2.2\text{nF}$ ซึ่งช่วยลดการสั่นได้มากพอสมควร

- พัลส์รูป (ค) ใช้วงจรสวิตช์ที่เปิดอย่างช้าๆ ด้วยค่า R_i 1.5k Ω , C_c 150pF และ R_G 1.5 k Ω ซึ่งไม่ปรากฏการสั่นที่ขอบขาลงของสัญญาณพัลส์
- พัลส์รูป (ง) การขึ้นอย่างช้าๆของสัญญาณพัลส์ ภายใต้แสงแดดอ่อนๆ (V_{OC} และ I_{SC} ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แผงหนึ่งเป็น 64V และ 15mA)

สำหรับสัญญาณพัลส์ซึ่งถูกสร้างจาก DCU จะได้สัญญาณพัลส์ที่ DCU เป็นดังรูปที่ 6.16 โดยที่

- พัลส์รูป (ก) เป็นพัลส์ที่สร้างจาก MOSFET สวิตช์ (FQP7N80) ภายใต้แสงแดดจัด (V_{OC} 86V, I_{SC} 690mA) ซึ่งเป็นพัลส์ที่มีขอบขาลงชันมากและมีลักษณะเป็นดังผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 6.7 (ข)
- พัลส์รูป (ข) ใช้วงจรสวิตช์ที่เปิดอย่างช้าๆ ด้วยค่า R_i 560 Ω , C_c 150pF และ R_G 560 Ω ซึ่งไม่ปรากฏการสั่นที่ขอบขาลงของสัญญาณพัลส์
- พัลส์รูป (ค) การขึ้นอย่างช้าๆของสัญญาณพัลส์ ภายใต้แสงแดดอ่อนๆ (V_{OC} 64V, I_{SC} 15mA)



รูปที่ 6.16 สัญญาณพัลส์จริงคร่อมตัวรวบรวมข้อมูล (DCU) แบบต่างๆ
เมื่อสัญญาณพัลส์ถูกสร้างจากสวิตช์บนตัว DCU เอง

6.6 สรุปข้อดีและข้อเสียระหว่างการสื่อสารด้วยคลื่นความถี่พาหะและการสื่อสารด้วยพัลส์

- การสื่อสารด้วยคลื่นความถี่พาหะอาจถูกสัญญาณรบกวนแบบ switching รบกวนการสื่อสารได้ แต่แบบพัลส์เป็นสัญญาณขนาดใหญ่มากจึงถูกรบกวนได้ยาก
- การสื่อสารด้วยคลื่นความถี่พาหะจะต้องเปิดภาครับรอไว้ ซึ่งถ้าภาครับดังกล่าวใช้กระแสชั๊ก 10mA ก็อาจไม่สามารถใช้ตัวควบคุมแรงดันแบบง่ายได้ (ดังจะกล่าวภายหลังในหัวข้อที่ 8.3) ต้องเปลี่ยนไปใช้ตัวควบคุมแรงดันแบบ switching แทนจึงทำให้ต้นทุนของตัวตรวจวัดสูงขึ้น แต่วงจรรับสัญญาณพัลส์นั้นไม่ใช้กระแสสงบเลย จึงใช้วงจรควบคุมแรงดันแบบง่ายซึ่งมีต้นทุนต่ำได้

- การผลิตวงจรรีโอสารด้วยคลื่นความถี่พาหะต้องควบคุมค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ใช้สร้างวงจรรอง ซึ่งเป็นความยุ่งยากในการผลิตระดับหนึ่ง
- วงจรรีโอสารด้วยคลื่นความถี่พาหะซับซ้อนกว่าแบบพัลส์ ทำให้ต้นทุนของตัวตรวจวัดสูงกว่า

ข้อเสียของการรีโอสารแบบพัลส์คือต้องเสียพลังงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทิ้งไปในการสร้างพัลส์ขนาดใหญ่ แต่กระนั้นการวัดแรงดันคร่อมแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อตรวจวัดคุณภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นี้อาจตรวจเพียงวันละ 1-2 ครั้งโดยแต่ละครั้งใช้เวลาเพียง 2-3 วินาที ก็คงไม่สิ้นเปลืองพลังงานไปมากนัก



บทที่ 7

การวิเคราะห์เสถียรภาพวงจรสวิทช์แบบเปิดเข้า

วงจรเชิงเส้นโดยทั่วไปสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (7-1) โดยที่ $X(t)$ เป็นตัวแปรสถานะ (state variable) และ $U(t)$ เป็นสัญญาณขาเข้าของวงจรตัวแปรทั้งคู่เป็นเมทริกซ์ขนาด $n \times 1$ (หรือเวกเตอร์) ส่วน A และ B เป็นเมทริกซ์สัมประสิทธิ์ขนาด $n \times n$ สมการนี้แบ่งออกเป็น 2 พจน์ซึ่งถูกเรียกว่า Homogeneous State และ Forced State ตามลำดับ และมีผลเฉลยดังสมการที่ (7-2) [45] โดยพจน์แรกหรือ Homogeneous solution จะแสดงถึงลักษณะของระบบ (system characteristic) ผ่านทางเมทริกซ์ A และค่าเริ่มต้นของระบบ $X(0)$ ส่วนพจน์ที่หลังหรือ Particular solution จะแสดงถึงผลตอบของระบบที่มีต่อสัญญาณขาเข้า $U(t)$

$$\frac{dX(t)}{dt} = A \times X(t) + B \times U(t) \quad (7-1)$$

$$X(t) = \exp(At)X(0) + \int_0^t \exp A(t-\tau) \times B \times U(\tau).d\tau \quad (7-2)$$

และในกรณีของเราซึ่ง $U(t)$ เป็นอนุกรมของฟังก์ชันขั้นบันไดดังสมการที่ (7-3) โดยที่ $u(t)$ คือ unit step function

$$U(t) = \begin{bmatrix} k_1 \\ \vdots \\ k_N \end{bmatrix} u(t) = K \times u(t) \quad (7-3)$$

สมการที่ (7-1) ก็จะมีผลเฉลยเป็น [45]

$$X(t) = \exp(At)X(0) + A^{-1} \exp(At) - I BK \quad (7-4)$$

สังเกตว่า ถ้า $A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$ แล้ว $\exp(At) \neq \begin{bmatrix} \exp(a_{11}t) & \cdots & \exp(a_{1n}t) \\ \vdots & & \vdots \\ \exp(a_{n1}t) & \cdots & \exp(a_{nn}t) \end{bmatrix}$

ซึ่งแสดงไว้ ณ ที่นี้เพื่อป้องกันการเข้าใจผิด

จากนั้น เมื่อแยกวิเคราะห์สมการที่ (7-1) เฉพาะในส่วนแรกหรือ Homogeneous State

$$\frac{dX(t)}{dt} = A \times X(t) \quad (7-5)$$

เราจะแก้สมการ (7-5) นี้ด้วยการสมมติให้มันมีผลเฉลยเป็น

$$X(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \cdots & m_{1n} \\ m_{21} & m_{22} & \cdots & m_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{n1} & m_{n2} & \cdots & m_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(\lambda_1 t) \\ \exp(\lambda_2 t) \\ \vdots \\ \exp(\lambda_n t) \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} \exp(\lambda_1 t) \\ \exp(\lambda_2 t) \\ \vdots \\ \exp(\lambda_n t) \end{bmatrix} \quad (7-6)$$

และจะได้

$$\frac{dX(t)}{dt} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \vdots \\ \dot{x}_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1 m_{11} & \lambda_2 m_{12} & \cdots & \lambda_n m_{1n} \\ \lambda_1 m_{21} & \lambda_2 m_{22} & \cdots & \lambda_n m_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \lambda_1 m_{n1} & \lambda_2 m_{n2} & \cdots & \lambda_n m_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(\lambda_1 t) \\ \exp(\lambda_2 t) \\ \vdots \\ \exp(\lambda_n t) \end{bmatrix} \quad (7-7)$$

แทนค่า (7-6) และ (7-7) ลงในสมการ (7-5) จะได้

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 m_{11} & \lambda_2 m_{12} & \cdots & \lambda_n m_{1n} \\ \lambda_1 m_{21} & \lambda_2 m_{22} & \cdots & \lambda_n m_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \lambda_1 m_{n1} & \lambda_2 m_{n2} & \cdots & \lambda_n m_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(\lambda_1 t) \\ \exp(\lambda_2 t) \\ \vdots \\ \exp(\lambda_n t) \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \cdots & m_{1n} \\ m_{21} & m_{22} & \cdots & m_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{n1} & m_{n2} & \cdots & m_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(\lambda_1 t) \\ \exp(\lambda_2 t) \\ \vdots \\ \exp(\lambda_n t) \end{bmatrix} \quad (7-8)$$

และเพื่อความง่าย เราจะกำหนดให้

$$m_i = \begin{bmatrix} m_{1i} \\ m_{2i} \\ \vdots \\ m_{ni} \end{bmatrix} \quad (7-9)$$

แล้วเขียนสมการ (7-8) ใหม่อีกครั้งได้

$$\lambda_1 m_1 \quad \lambda_2 m_2 \quad \cdots \quad \lambda_n m_n \begin{bmatrix} \exp(\lambda_1 t) \\ \exp(\lambda_2 t) \\ \vdots \\ \exp(\lambda_n t) \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} m_1 & m_2 & \cdots & m_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(\lambda_1 t) \\ \exp(\lambda_2 t) \\ \vdots \\ \exp(\lambda_n t) \end{bmatrix} \quad (7-10)$$

และจะได้เงื่อนไขสำคัญดังนี้

$$\lambda_1 m_1 \quad \lambda_2 m_2 \quad \cdots \quad \lambda_n m_n = A \begin{bmatrix} m_1 & m_2 & \cdots & m_n \end{bmatrix} = A m_1 \quad A m_2 \quad \cdots \quad A m_n \quad (7-11)$$

$$\lambda_i m_i = A m_i \quad \text{for } i=1,2,\dots,n \quad (7-12)$$

$$\lambda_i I - A \quad m_i = 0 \quad (7-13)$$

โดยที่ I คือเมตริกซ์เอกลักษณ์

ค่า m_i ในสมการที่ (7-13) นี้จะไม่เป็นเวกเตอร์ศูนย์ ก็ต่อเมื่อดีเทอร์มิแนนต์ของ $\lambda_i I - A$ เป็นศูนย์นั่นเอง

$$\det \lambda_i I - A = 0 \quad (7-14)$$

และสมการที่ (7-14) นี้เองได้ถูกนิยามเป็น สมการคุณสมบัตินี้ (characteristic equation) ของเมตริกซ์ A [45] และมันสามารถกระจายออกมาเป็นพหุนามอันดับที่ n ดังสมการที่ (7-15) จึงทำให้ λ มีจำนวน n คำตอบ

$$\lambda^n + a_{n-1}\lambda^{n-1} + a_{n-2}\lambda^{n-2} + \dots + a_1\lambda + a_0 = 0 \quad (7-15)$$

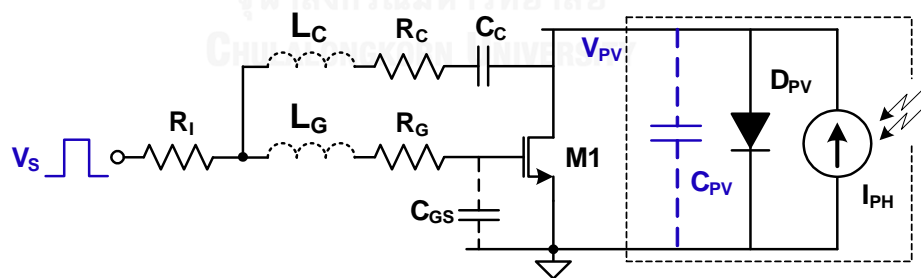
ค่า λ และ m_i นี้ถูกเรียกว่า Eigenvalue และ Eigenvector ของเมตริกซ์ A และค่า λ นี้เป็นเลขยกกำลังของฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลของ $x_i(t)$ ในสมการที่ (7-6) ซึ่งอาจเป็นจำนวนเชิงซ้อน

$$\lambda = \alpha + j\beta = \alpha + j2\pi f \quad \alpha, \beta, f \in \text{real number} \quad (7-16)$$

ตัวอย่างเช่น ถ้าสัญญาณ $x_i(t)$ มีพจน์หนึ่งๆ เป็น

$$\exp(\alpha t + j2\pi f t) + \exp(\alpha t - j2\pi f t) = \exp(\alpha t) \times 2 \cos(2\pi f t) \quad (7-17)$$

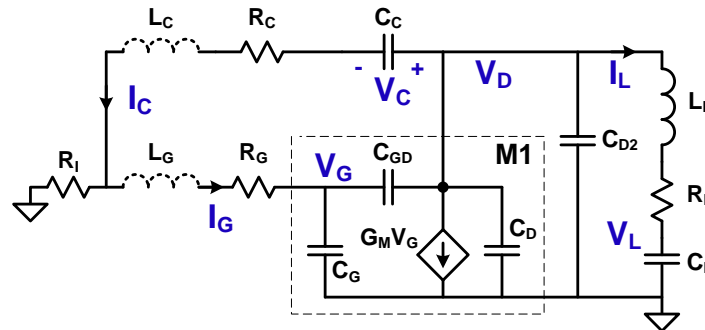
สัญญาณ $x_i(t)$ ก็จะมีส่วนประกอบซึ่งสั้นที่ความถี่ f และมีขนาดโตขึ้นเรื่อยๆ ถ้า α มีค่าเป็นจำนวนจริงบวก แต่ถ้า α มีค่าเป็นจำนวนจริงลบ สัญญาณ $x_i(t)$ ก็จะมีขนาดลดลงเรื่อยๆ จากค่าเริ่มต้น $x(0)$ จนหายไป



รูปที่ 7.1 วงจรสวิตช์แบบเปิดซ้ำจากหัวข้อที่ 6.4

สำหรับวงจรสวิตช์แบบเปิดซ้ำดังรูปที่ 7.1 ในขณะที่สวิตช์กำลังเปิด หรือ MOSFET $M1$ มีกระแส I_{M1} ไหลและ $V_{DS} > V_{GS}$ (saturation region) วงจรสมมูลเชิงเส้นของ $M1$ [46] สามารถแทนได้ด้วยวงจรในกรอบสี่เหลี่ยมในรูปที่ 7.2 (หมายเหตุ การประมาณแบบเชิงเส้นนี้อาจทำให้ผลวิเคราะห์ที่ได้ไม่ถูกต้องนักจึงอาจจะต้องศึกษาในเชิงลึกเรื่อง nonlinear oscillation เพิ่มเติม) ส่วนอุปกรณ์ตัวอื่นๆจะมีความหมายและค่าประกอบการคำนวณดังตารางที่ 7.1 โดยที่ค่าประกอบการ

ค่านวมของอุปกรณ์ต่างๆของวงจรสวิตช์แบบเปิดข้านี้จะถูกแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ กรณีของตัวตรวจวัด (Monitoring Unit, MU) และกรณีของตัวรวบรวมข้อมูล (Data Collector Unit, DCU)



รูปที่ 7.2 วงจรสมมูลเชิงเส้นของสวิตช์แบบเปิดข้า

ตารางที่ 7.1 ความหมายของอักษรย่อในรูป 7.2 และค่าประกอบการคำนวณ Eigenvalue ในรูปที่ 7.3 และ 7.4

อักษรย่อ	กรณี	ความหมาย	อ้างอิง	ค่าที่ใช้คำนวณ
G_M	MU	ค่า Transconductance ของ MOSFET M1	[46]	ช่วง $0.1 - 15 \Omega^{-1}$
	DCU			
C_G, C_{GD}, C_D	MU	ค่าความจุระหว่างขา gate-source, gate-drain, drain-source ของ MOSFET M1	[47]	550pF 15pF 75pF (IRFS630)
	DCU		[48]	
R_1, C_c	MU	ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ เพื่อใช้สร้างการเปิดอย่างช้าๆของ MOSFET M1	หัวข้อ 6.4	1500 Ω , 150 pF
	DCU			560 Ω , 150 pF
C_{D2}	MU	ตัวเก็บประจุของวงจรภาครับสัญญาณพัลส์	หัวข้อ 8.2	470 pF
	DCU	ตัวเก็บประจุของวงจรภาครับสัญญาณพัลส์ + ค่าความจุสมมูลของสายส่งไฟฟ้ากำลัง C_{TL2}	หัวข้อ 6.2	220pF + 263 pF
L_L	MU	ตัวเหนี่ยวนำภายในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ L_5	ตาราง 4.1	0.8 uH
	DCU	ตัวเหนี่ยวนำภายในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออนุกรมกัน + ค่าความเหนี่ยวนำสมมูลของสายส่งไฟฟ้ากำลัง L_{TL2}	ตาราง 4.1 หัวข้อ 6.2	$8 \times 0.8 \text{ uH} + 31 \text{ uH}$
R_L	MU	ตัวต้านทานภายในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ R_5	ตาราง 4.1	2.82 Ω
	DCU	ตัวต้านทานภายในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออนุกรมกัน		$8 \times 2.82 \Omega$
C_L	MU	ตัวเก็บประจุภายในแผงเซลล์แสงอาทิตย์	ตาราง 4.1	92.3 nF
	DCU	ตัวเก็บประจุภายในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออนุกรมกัน		$92.3 \text{ nF} / 8$
L_G, L_C	MU	ตัวเหนี่ยวนำที่อาจเกิดจากความยาวของแผงวงจรหรือขาอุปกรณ์	-	(ค่าสมมติ) 20 nH
	DCU			
R_G, R_C	MU	ตัวต้านทานที่ใส่เพิ่มเพื่อลดการสั่นของ	-	1500 Ω
	DCU	วงจรสวิตช์แบบเปิดข้า		560 Ω

จากวงจรสมมูลเชิงเส้นของสวิตช์แบบเปิดเข้าในรูปที่ 7.2 เราจะสามารถเขียนสมการได้ 7 สมการดังต่อไปนี้

$$\text{ที่โหนด } V_G \quad C_G + C_{GD} \frac{dV_G}{dt} - C_{GD} \frac{dV_D}{dt} = I_G \quad (7-18)$$

$$\text{ที่โหนด } V_D \quad C_D + C_{D2} + C_{GD} \frac{dV_D}{dt} - C_{GD} \frac{dV_G}{dt} + G_M V_G + I_C + I_L = 0 \quad (7-19)$$

$$C_C \frac{dV_C}{dt} = I_C \quad (7-20)$$

$$C_L \frac{dV_L}{dt} = I_L \quad (7-21)$$

$$\text{วงรูป } R_I L_G R_G C_G \quad L_G \frac{dI_G}{dt} + I_G R_G + V_G = R_I I_C - I_G \quad (7-22)$$

$$\text{วงรูป } R_I L_C R_C C_D \quad R_I I_C - I_G + L_C \frac{dI_C}{dt} + I_C R_C + V_C = V_D \quad (7-23)$$

$$\text{วงรูป } C_L R_L L_L C_D \quad V_L + R_L I_L + L_L \frac{dI_L}{dt} = V_D \quad (7-24)$$

และจะได้

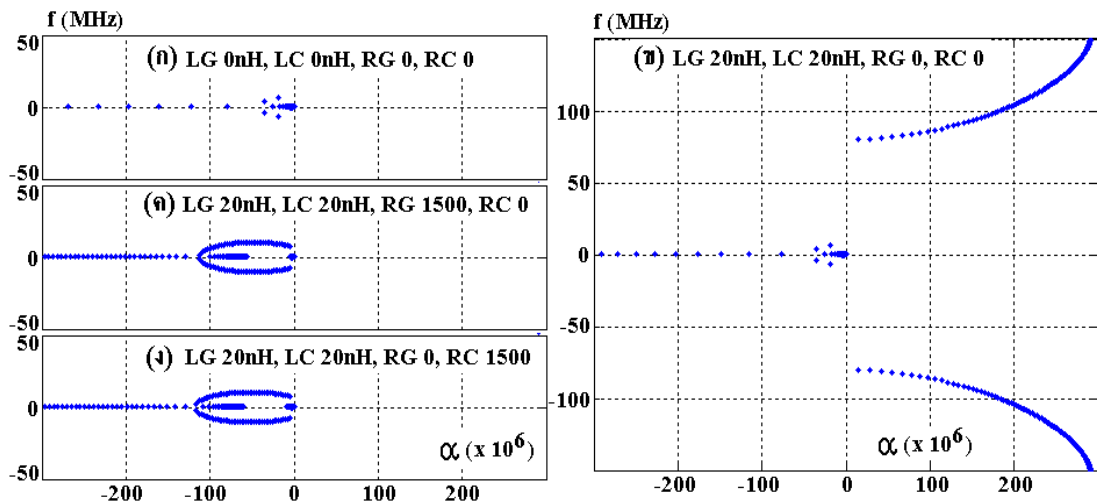
$$\begin{bmatrix} C_G + C_{GD} & -C_{GD} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -C_{GD} & C_D + C_{D2} + C_{GD} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_C & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_C & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_G \\ V_D \\ V_C \\ V_L \\ I_G \\ I_C \\ I_L \end{bmatrix} = G \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_G \\ V_D \\ V_C \\ V_L \\ I_G \\ I_C \\ I_L \end{bmatrix} =$$

$$= H \begin{bmatrix} V_G \\ V_D \\ V_C \\ V_L \\ I_G \\ I_C \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -G_M & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & -R_G - R_I & R_I & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & R_I & -R_C - R_I & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & -R_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_G \\ V_D \\ V_C \\ V_L \\ I_G \\ I_C \\ I_L \end{bmatrix} \quad (7-25)$$

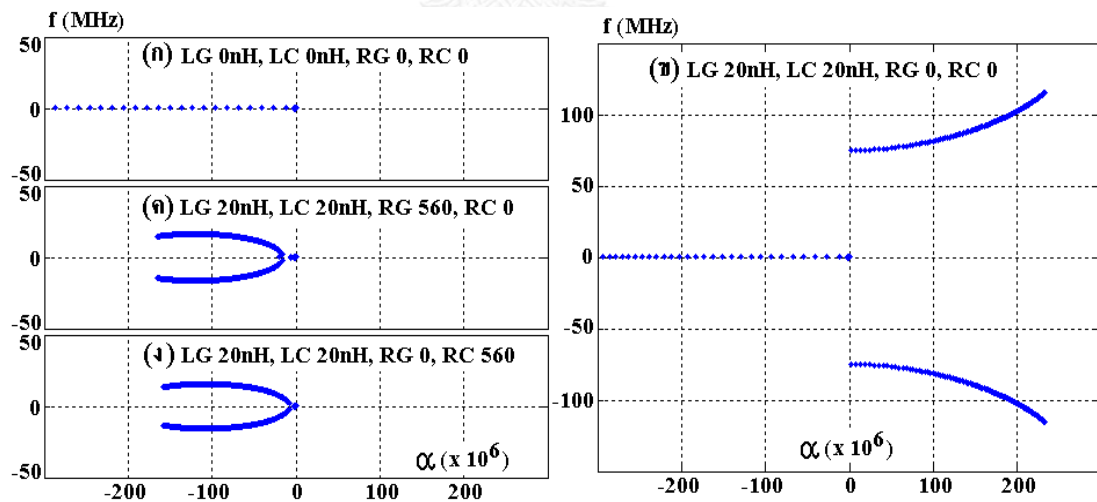
โดยที่เมตริกซ์ A ในสมการที่ (7-5) และ (7-14) คือ $A = G^{-1}H$ (7-26)

จากนั้นเมื่อใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยคำนวณดังในภาคผนวก ข โดยใช้ค่าประกอบการคำนวณของอุปกรณ์ดังตารางที่ 7.1 ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ กรณีของตัวตรวจวัด (Monitoring Unit, MU) และกรณีของตัวรวบรวมข้อมูล (Data Collector Unit, DCU) และกวาดค่า G_M จาก $0.1 \Omega^{-1} - 15 \Omega^{-1}$ ก็จะได้ค่า Eigenvalue, λ (หรือ closed loop poles) ซึ่งมีส่วนประกอบ α (แกนนอน)

และ f (แกนตั้ง) ดังรูปที่ 7.3 และรูปที่ 7.4 ตามลำดับ โดยที่รูป (ก) เป็นกรณีที่ตัวเหนี่ยวนำที่อาจเกิดจากความยาวของแผงวงจรหรือขาอุปกรณ์ L_G , L_C มีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งมีโพลอยู่ฝั่งซ้ายทั้งหมดจึงหมายถึงวงจรมีเสถียรภาพดี รูป (ข) เป็นกรณีที่สมมติให้ L_G และ L_C มีค่า 20nH ซึ่งมีโพลบางโพลอยู่ฝั่งขวาจึงหมายถึงวงจรไม่เสถียรภาพ หรือมีการสั่นเกิดขึ้น และการสั่นนี้สามารถแก้ได้ด้วยการเพิ่ม R_G หรือ R_C เข้าไปก็จะได้โพลอยู่ฝั่งซ้ายทั้งหมดดังรูป (ค) และ (ง) ตามลำดับ



รูปที่ 7.3 ค่า Eigenvalue, α (แกนนอน) และ f (แกนตั้ง) ของวงจรสวิตช์แบบเปิดเข้า
บนตัวตรวจวัด (Monitoring Unit, MU)



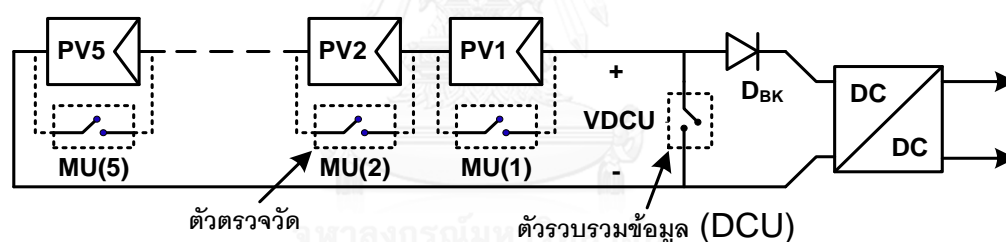
รูปที่ 7.4 ค่า Eigenvalue, α (แกนนอน) และ f (แกนตั้ง) ของวงจรสวิตช์แบบเปิดเข้า
บนตัวรวบรวมข้อมูล (Data Collector Unit, DCU)

บทที่ 8

วงจรและการทดสอบ การสื่อสารผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลังด้วยสัญญาณพัลส์

ในบทที่ 6 ได้กล่าวถึงหลักการของการสื่อสารผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลังด้วยสัญญาณพัลส์ ความไม่อุดมคติของสัญญาณพัลส์ที่สร้างได้ และการแก้ไขการสั้นที่ขอบขาลงของสัญญาณพัลส์ด้วยวงจรสวิตช์แบบเปิดชั่วคราวไปถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพพวงจรสวิตช์แบบเปิดชั่วคราวเชิงทฤษฎีในบทที่ 7 อีกด้วยในบทที่ 8 นี้จะกล่าวถึงการสร้างวงจรและการทดลองใช้งานจริง

จุดประสงค์ของการทดลองนี้คือ การวัดแรงดันบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทุกๆแผงซึ่งต่อกันแบบอนุกรมดังรูปที่ 8.1 เริ่มจากตัวตรวจวัด (Monitoring unit, MU) ทุกๆตัวซึ่งติดอยู่กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ในสถานะหลับ จากนั้น DCU (Data Collector Unit) จะส่งพัลส์จำนวนหนึ่งไปปลุก MU ทุกๆตัวให้ตื่นขึ้น และรอซักช่วงเวลาหนึ่ง (~5ms) ให้ทุกๆ MU พร้อมทั้งจะรับคำสั่ง แล้วจึงสั่งให้ทุกๆ MU วัดบนแรงดันแผงเซลล์แสงอาทิตย์พร้อมๆกัน จากนั้นก็สั่งให้ MU1, MU2 ... MU5 ส่งผลการวัดให้ DCU ทีละตัวเมื่อการส่งผลการวัดเสร็จสิ้น และ MU ไม่ได้รับคำสั่งใดๆอีกจาก DCU เป็นช่วงเวลาประมาณ 200 ms MU ทุกๆตัวก็จะเข้าสู่สถานะหลับเองอีกครั้ง



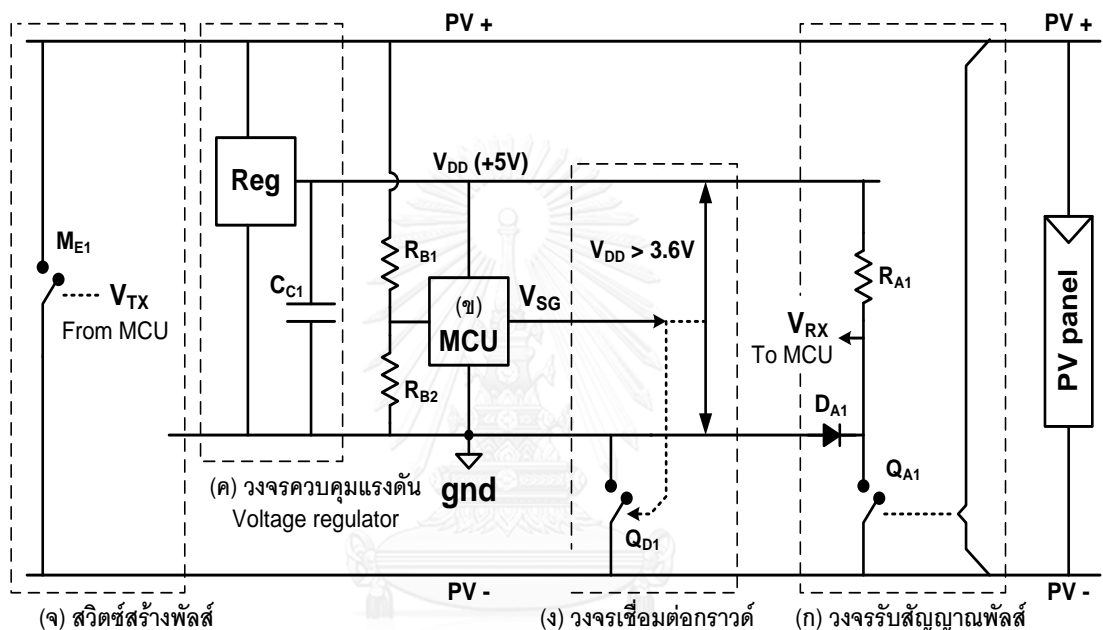
รูปที่ 8.1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งต่อกันแบบอนุกรม

8.1 วงจรของตัวตรวจวัด (Monitoring unit, MU)

เนื่องจากตัวตรวจวัดต้องติดอยู่กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทุกๆแผง ดังนั้นการออกแบบตัวตรวจวัดที่ดีคือ “ต้องราคาถูก” และ “ใช้พลังงานต่ำ” ฉะนั้น การหลีกเลี่ยงอุปกรณ์หรือวงจรรวม (integrated circuit, IC) ที่มีราคาสูง และการปิดตัวเองหลังการใช้งานจึงเป็นสิ่งที่สำคัญยิ่ง ตัวตรวจวัดมีส่วนประกอบ 5 ส่วนหลักๆดังรูปที่ 8.2 ดังนี้

- (ก) วงจรรับสัญญาณพัลส์ (Pulse receiver) มีหน้าที่หลักคือแปลงสัญญาณพัลส์ขนาดใหญ่เป็นพัลส์ขนาด 5 โวลต์ให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์

- (ข) ไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) เลือกใช้เบอร์ ATmega8 ใช้ถอดรหัส-เข้ารหัส (decode – encode) สัญญาณพัลส์ อีกทั้งภายในยังมี ADC (Analog to Digital Converter) เพื่อใช้วัดแรงดันคร่อมแผงเซลล์สุริยะ
- (ค) วงจรควบคุมแรงดัน (Voltage regulator) ใช้แปลงแรงดันคร่อมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ประมาณ 30 – 100 โวลต์ เป็นแรงดันประมาณ 5 โวลต์ซึ่งใช้เป็นไฟเลี้ยงไมโครคอนโทรลเลอร์
- (ง) วงจรเชื่อมต่อกราวด์ (gnd) ซึ่งจะกล่าวถึงในภายหลัง
- (จ) สวิตช์สร้างสัญญาณพัลส์

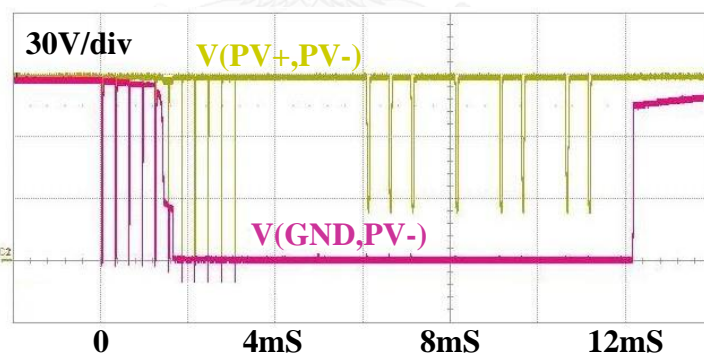


รูปที่ 8.2 วงจรส่วนต่างๆภายในตัวตรวจวัด (Monitoring unit, MU)

จะสังเกตได้ว่าวงจรรูปที่ 8.2 มีการแยกกราวด์ของวงจร (gnd) ออกจากขั้วลบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV-) เพื่อให้หลังจากการปิดตัวเองของตัวตรวจวัดจะไม่กินพลังงานไฟฟ้าเลย (Zero standby power) โดยที่ในขณะที่ปิดตัวเองนี้แรงดัน gnd (เทียบ PV-) จะมีค่าแรงดันเท่ากับ PV+ (เทียบ PV-) ดังรูปที่ 8.3 ก่อนเวลา 0 mS ส่วนการตื่นกลับขึ้นมาทำงานก็จะใช้วงจรรับสัญญาณพัลส์คร่อม PV+ และ PV- นั้นเองมาเชื่อมต่อระหว่าง gnd และ PV- ด้วยสวิตช์ Q_{A1} ให้ติดกันผ่านไดโอด D_{A1} แต่วงจรนี้เชื่อมต่อ gnd กับ PV- ได้เพียงแค่วางเวลาสั้นๆแล้วก็ปล่อยการเชื่อมต่อ จึงอาจต้องใช้หลายๆพัลส์ในการปลุกให้ตื่นดังรูปที่ 8.3 ในช่วงเวลา 0- 2 mS ซึ่งแต่ละพัลส์จะมีกระแสไหลผ่านวงจรควบคุมแรงดัน (Reg) มาสะสมประจุที่ตัวเก็บประจุ C_{C1} คร่อมไฟเลี้ยง V_{DD} จึงทำให้แรงดัน V_{DD} สูงขึ้นทีละนิด และเมื่อแรงดัน V_{DD} มากกว่าประมาณ 3.2 โวลต์ วงจรเชื่อมต่อกราวด์ก็จะเปิดสวิตช์ Q_{D1} เพื่อเชื่อมต่อ gnd และ PV- แบบต่อเนื่อง และทำให้แรงดัน gnd (เทียบ PV-) เป็น 0 โวลต์ดังรูปที่ 8.3 ในช่วงเวลา 2 mS – 12 mS ส่วนไฟเลี้ยง V_{DD} (เทียบ gnd) ก็จะมีเพิ่มขึ้นจนเต็ม 5 โวลต์

ขณะที่ไฟเลี้ยงตื่นเต็มที่แล้วและยังไม่มีพัลส์คร่อม PV+ และ PV- มาถึง แรงดันที่โหนด V_{RX} จะเป็น 5 โวลต์ (เทียบ gnd) ด้วย R_{A1} และเมื่อใดก็ตามที่สัญญาณพัลส์คร่อม PV+ และ PV- มาถึง สวิตช์ Q_{A1} ก็จะทำให้แรงดันที่โหนด V_{RX} จะเป็น 0 โวลต์ (เทียบ gnd) เพื่อแสดงการมาของสัญญาณพัลส์ให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) ถอดรหัสว่าเป็นคำสั่งอะไรต่อไป MCU ซึ่งมีวงจร ADC (Analog to Digital Converter) ภายในตัว สามารถวัดแรงดันหรือกระแสคร่อมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV panel) ผ่านทาง R_{B1} และ R_{B2} หรืออาจจะเพิ่มตัววัดอุณหภูมิ (TC1047AVNBTR) เพื่อวัดอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์เข้าไปอีกด้วยก็ได้ จากนั้น MCU ก็ส่งข้อมูลที่วัดได้ไปยังตัวรวบรวมข้อมูล (DCU) ด้วยสวิตช์สร้างสัญญาณพัลส์ (จ) ดังตัวอย่างสัญญาณพัลส์ในรูปที่ 8.3 ระหว่างช่วงเวลา 6 mS - 12 mS

หลังจากที่ MCU วางจากการทำงานและไม่มีสัญญาณพัลส์มาสื่อสารกับมันเกินกว่า 200 mS MCU ก็จะสั่งปิดวงจรเชื่อมต่อกบราวด์ เพื่อปลดการเชื่อมต่อ gnd ออกจาก PV- แรงดันไฟเลี้ยง V_{DD} ก็จะลดลงเรื่อยๆจนกระทั่งต่ำกว่า 2.6 โวลต์ MCU ก็จะรีเซ็ตตัวเอง (หยุดทำงาน) หรือหยุดสั่งวงจรเชื่อมต่อกบราวด์ ซึ่งที่ระดับแรงดันนี้ วงจรเชื่อมต่อกบราวด์ซึ่งทำงานที่แรงดันไฟเลี้ยงมากกว่าประมาณ 3.2 โวลต์ จะไม่สามารถเชื่อมต่อ gnd และ PV- ได้อีก จึงให้แรงดันไฟเลี้ยงค่อยๆลดลงจนหมดไปในที่สุดและแรงดัน gnd (เทียบ PV-) ก็จะกลับไปมีค่าเท่ากับ PV+ (เทียบ PV-) ดังรูปที่ 8.3 ที่หลังเวลา 12 mS



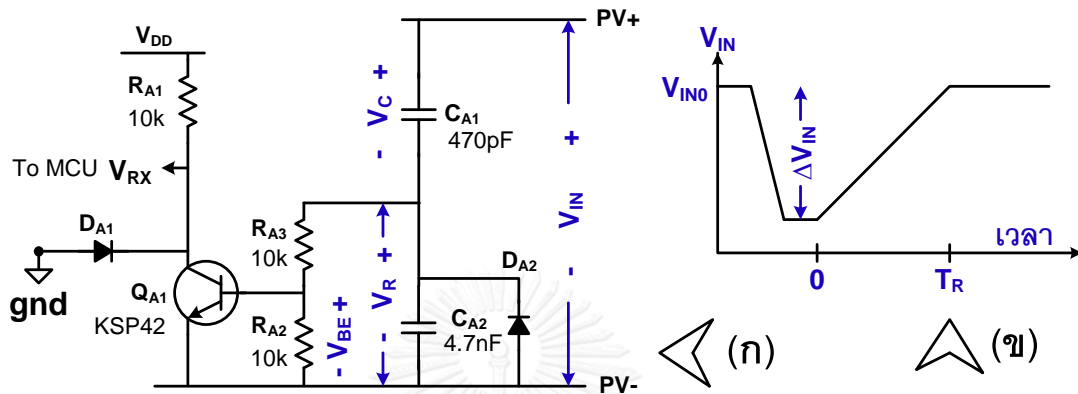
รูปที่ 8.3 แรงดันที่โหนด gnd และ PV+ (เทียบ PV-) จากการทดลองจริง
บนวงจรตัวตรวจวัดดังรูปที่ 8.2

8.2 วงจรรับสัญญาณพัลส์

วงจรรับสัญญาณพัลส์เป็นวงจรง่ายดังรูปที่ 8.4 (ก) ณ จุดทำงานสงบ (operating point) ที่แรงดันคร่อมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ $V_{IN} = V_{IN0}$, $V_C = V_{IN0}$, $V_R = 0$ และทรานซิสเตอร์ Q_{A1} ยังอยู่ในสภาวะหยุดทำงานเมื่อใดก็ตามที่มีพัลส์มาถึง V_{IN} ตกลงเป็น $V_{IN0} - \Delta V_{IN}$ ดังรูปที่ 8.4 (ข) ประจุคร่อม

C_{A1} ก็จะไหลออกผ่านไดโอด D_{A2} และจะได้แรงดัน V_C และ V_R ที่เวลา 0 ดังนี้ (ประมาณให้ไดโอด D_{A2} มี threshold voltage เป็นศูนย์)

$$V_C(t=0) \approx V_{IN0} - \Delta V_{IN} \text{ และ } V_R(t=0) \approx 0 \quad (8-1)$$



รูปที่ 8.4 วงจรรับสัญญาณพัลส์ และสัญญาณพัลส์

จากวงจรและสัญญาณพัลส์ในรูปที่ 8.4 และสมมติให้แรงดัน $V_{BE} < 0.7V$ หรือทรานซิสเตอร์ Q_{A1} ยังอยู่ในสภาวะหยุดทำงาน เราจะได้สมการในช่วงเวลาระหว่าง $0 \leq t \leq T_R$ เป็นดังนี้

$$V_{IN}(t) = V_C(t) + V_R(t) \quad (8-2)$$

$$C_{A1} \frac{dV_C}{dt} = \frac{V_R}{R_{A2} + R_{A3}} + C_{A2} \frac{dV_R}{dt} \quad (8-3)$$

$$V_{BE}(t) = \frac{R_{A3}}{R_{A2} + R_{A3}} V_R(t) \quad (8-4)$$

$$V_{IN}(0 \leq t \leq T_R) = V_{IN0} - \Delta V_{IN} + \frac{\Delta V_{IN}}{T_R} t \quad (8-5)$$

ซึ่งสมการเหล่านี้ รวมไปถึงเงื่อนไขที่ (8-1) จะสามารถแก้สมการหาแรงดัน V_{BE} ได้ดังนี้

$$V_{BE}(0 \leq t \leq T_R) = \frac{\Delta V_{IN}}{T_R} \tau_2 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) \right) \quad (8-6)$$

โดยที่ $\tau_1 = (R_{A2} + R_{A3})(C_{A1} + C_{A2})$, $\tau_2 = R_{A2}C_{A1}$ และจากค่า RC ในรูปที่ 8.4 (ก) จะได้ $\tau_1 = 103\mu s$ และ $\tau_2 = 4.7\mu s$

ในกรณีของพัลส์ปกติ $\Delta V_{IN} = 50V$, $T_R = 10\mu s - 200\mu s$ จะได้ $V_{BE} = 2.17V - 1V$ ซึ่งมากกว่า $0.7V$ จึงทำให้ทรานซิสเตอร์ Q_{A1} มีกระแสคอลเล็กเตอร์ไหล หรือก็คือการเชื่อมต่อให้ gnd และ PV- ติดกันนั่นเอง

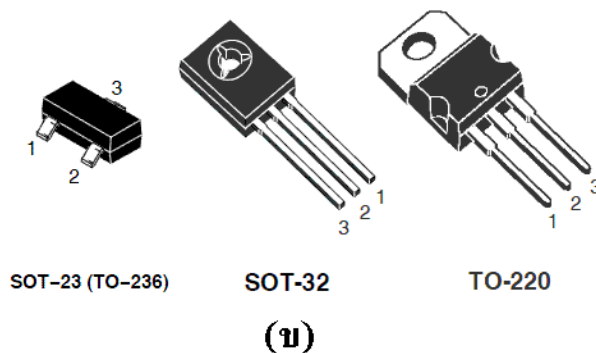
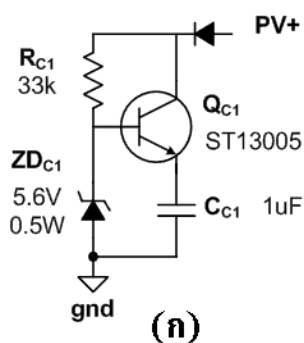
ในกรณีที่มีสัญญาณขนาดเล็กที่ไม่เพียงประสงค์ที่มีขนาด ΔV_{IN} ไม่มากนัก ($< 10V$) แต่มีความชันสูง ($T_R < \tau_1$) เราจะสามารถประมาณสมการที่ (8-6) ได้เป็นดังสมการที่ (8-7) ซึ่งจะมีอัตราส่วนของตัวต้านทานและตัวเก็บประจุช่วยลดทอนให้ V_{BE} มีค่าน้อยกว่า 0.7V ตัวอย่างเช่นถ้า $\Delta V_{IN} = 10V$, $T_R = 1\mu S - 20\mu S$ จะได้ $V_{BE}(t = T_R) \approx 0.45V$ เป็นต้น

$$V_{BE}(0 \leq t \leq T_R) \approx \frac{\Delta V_{IN}}{T_R} \tau_2 \frac{t}{\tau_1} \rightarrow V_{BE}(t = T_R) = \Delta V_{IN} \frac{R_{A2}}{R_{A2} + R_{A3}} \frac{C_{A1}}{C_{A1} + C_{A2}} \quad (8-7)$$

ในกรณีที่ ΔV_{IN} มีขนาดใหญ่แต่มี T_R ช้า ($> 1ms$) ซึ่งอาจเกิดจากเงาเมฆหรือเครื่องบินเราจะสามารถประมาณสมการที่ (8-6) ได้เป็นดังสมการที่ (8-8) ซึ่งจะมี τ_1/T_R ช่วยลดทอนให้ V_{BE} มีค่าน้อยกว่า 0.7V ตัวอย่างเช่นถ้า $\Delta V_{IN} = 100V$, $T_R = 1ms$ จะได้ $V_{BE}(t = T_R) \approx 0.47V$ เป็นต้น

$$V_{BE}(\tau_1 \ll t < T_R) = \frac{\Delta V_{IN}}{T_R} \tau_2 \quad (8-8)$$

8.3 วงจรควบคุมแรงดันไฟเลี้ยง



รูปที่ 8.5 วงจรควบคุมแรงดันไฟเลี้ยงแบบเชิงเส้น และของตัวถังของทรานซิสเตอร์ Q_{C1} แบบต่างๆ

วงจรควบคุมแรงดันไฟเลี้ยงหรือ Voltage Regulator จะแบ่งเป็น 2 แบบคือแบบสวิตช์ซึ่ง (switching regulator) และแบบเชิงเส้น (linear regulator) เนื่องวงจรควบคุมแรงดันของตัวตรวจวัดต้องแปลงแรงดันแผงเซลล์แสงอาทิตย์จาก 30V – 100V ลงไปเป็น 5V ดังนั้นวงจรควบคุมแรงดันไฟเลี้ยงแบบสวิตช์ซึ่งจึงน่าจะเหมาะสม เพราะจะมีกำลังงานสูญเสียจากการแปลงแรงดันน้อยกว่าแบบเชิงเส้น แต่ก็จะมีราคาแพงกว่าและใช้อุปกรณ์มากกว่าด้วย ในอีกแง่มุมหนึ่งเมื่อเราคำนึงถึงว่าวงจรควบคุมแรงดันไฟเลี้ยงนี้ต้องจ่ายกระแสเท่าไร ก็พบว่าวงจรรับสัญญาณพัลส์และวงจรส่งสัญญาณพัลส์ ไม่กินกำลังงานเลยในขณะที่ไม่มีสัญญาณพัลส์ ส่วนไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) นั้นจะกินกระแสเพียงแค่ 1.6mA ที่สัญญาณนาฬิกา 1MHz เท่านั้น ดังนั้นวงจรควบคุมแรงดันไฟเลี้ยงแบบเชิงเส้นดังรูปที่ 8.5 (ก) ซึ่งมีราคาถูกลงกว่าและมีความซับซ้อนน้อยกว่าจึงน่าจะใช้งานได้แต่ยังคงต้องพิจารณาคำร้อนที่เกิดขึ้นบนทรานซิสเตอร์ Q_{C1} เป็นสำคัญตัวอย่างเช่น ถ้าแรงดันคร่อมแผงเซลล์

แสงอาทิตย์ (PV+, PV-) เป็น 95V แรงดันไฟเลี้ยงเป็น 5V (ที่ขา emitter) และกระแสโหลด 1.6mA จะมีกำลังงานสูญเสียใน $Q_{C1} = 90V \times 1.6mA = 0.27W$ และเมื่อมาลองพิจารณาความต้านทานการถ่ายเทอุณหภูมิ (Thermal resistance) และอุณหภูมิที่จะเกิดขึ้นบนตัวถัง (Case) แบบต่างๆดังรูปที่ 8.5 (ข) จะได้ดังตารางที่ 8.1 ซึ่งโดยปกติแล้วอุณหภูมิใช้งานบนตัวทรานซิสเตอร์ควรจะน้อยกว่า 120C (ลิมิต 150C)

ตารางที่ 8.1 ความต้านทานการถ่ายเทอุณหภูมิ (Thermal resistance) และอุณหภูมิที่จะเกิดขึ้นบนตัวถัง (Case) แบบต่างๆ

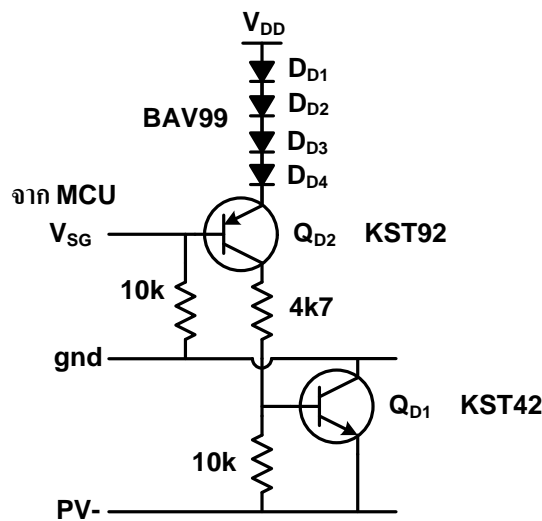
ชนิดตัวถัง	Thermal resistance Junction to ambient	อุณหภูมิบนทรานซิสเตอร์ในกรณีที่อุณหภูมิ ภายนอก(Ambient temperature) เป็น 75C
SOT-23	417 C/W	$0.27 W \times 417 C/W + 75C = 187.6C$
SOT-32	89 C/W	$0.27 W \times 89 C/W + 75C = 99C$
TO-220	62.5 C/W	$0.27 W \times 62.5 C/W + 75C = 91.9C$

นอกจากนี้ในขณะที่รับส่งสัญญาณพัลส์ประมาณ 10uS – 40uS จะเป็นช่วงที่วงจรควบคุมแรงดันไฟเลี้ยงไม่ได้รับไฟเลี้ยงจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โหลดที่ V_{DD} 5V ประมาณ 5mA และยอมให้ไฟเลี้ยงตกได้ 0.2V จะต้องใช้ค่า C_{C1} อย่างน้อยดังสมการที่ (8-9) แต่ก็ไม่ควรใช้ค่า C_{C1} ใหญ่มากเกินไป เพราะจะทำให้การตื่นกลับขึ้นมาทำงานจากการปิดตัวเองเป็นไปได้ยากขึ้น

$$C_{C1} = 5mA \times 40uS / 0.2V = 1uF \quad (8-9)$$

8.4 วงจรเชื่อมต่อกวารด์

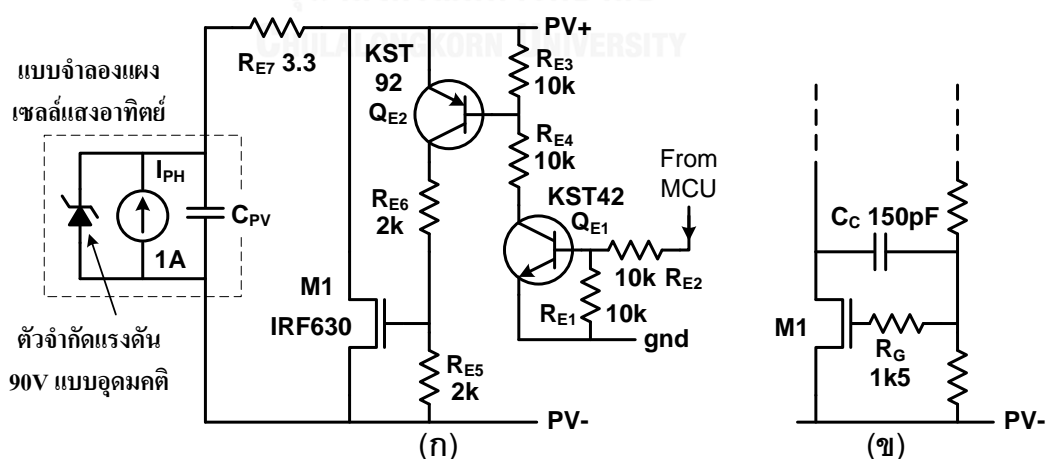
วงจรเชื่อมต่อกวารด์ดังรูปที่ 8.6 ทำหน้าที่เชื่อมต่อ gnd เข้ากับโหนด PV- เมื่อแรงดันไฟเลี้ยง V_{DD} สูงกว่า 3.2V การทำงานเริ่มจาก DCU ส่งขบวนพัลส์มาปลุกทำให้แรงดันไฟเลี้ยงค่อยๆเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในช่วงแรงดันไฟเลี้ยงระหว่าง 0 – 2.6V (BODLEVEL = 1, ATmega8) ไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) ซึ่งมีวงจร power on reset (POR) อยู่ภายใน จะรีเซ็ตตัวเองจึงทำให้ ขา I/O ทุกๆขาของ MCU (V_{SG}) มีสถานะเป็น high impedance และเมื่อแรงดันไฟเลี้ยงมากกว่า 2.6V จนถึง 5V วงจร oscillator ของ MCU ก็จะเริ่มสั่น MCU ก็จะเริ่มการทำงานและจะรอดต่อไปโดยไม่รับสัญญาณพัลส์ใดๆเข้ามาถอดรหัสอีกประมาณ 4mS เพื่อรอให้ขบวนพัลส์จาก DCU หหมดไป จึงจะเริ่มรับสัญญาณพัลส์เพื่อถอดรหัสต่อไป ไดโอด $D_{D1} - D_{D4}$ และ V_{BE} ของทรานซิสเตอร์ Q_{D2} จะทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดแรงดันไฟเลี้ยง V_{DD} 3.2V ซึ่งทำให้ทรานซิสเตอร์ Q_{D1} เริ่มเชื่อมต่อ gnd เข้ากับโหนด PV-



รูปที่ 8.6 วงจรเชื่อมต่อกราวด์

เมื่อใดก็ตามที่ MCU ทำงานเสร็จและไม่มีพัลส์จาก DCU มาถึงนานกว่า 200ms MCU จะปิดตัวเองด้วยการดึงแรงดันที่โหนด V_{SG} ขึ้น V_{DD} ก็จะทำให้ Q_{D2} และ Q_{D1} ปิดและไม่เชื่อมต่อ gnd เข้ากับโหนด PV- เป็นผลให้แรงดัน V_{DD} ค่อยๆตกลงจนกระทั่งต่ำกว่า 2.6V MCU ก็จะรีเซ็ตตัวเอง ทำให้ขา I/O ทุกๆขาของ MCU (V_{SG}) กลับมามีสถานะเป็น high impedance อีกครั้งหนึ่ง ซึ่ง ณ จุดนี้แรงดัน V_{DD} ต่ำกว่า 3.2V หรือวงจรเชื่อมต่อกราวด์ไม่ทำงานแล้ว ดังนั้นแรงดันไฟเลี้ยงจึงค่อยๆลดลงจนเป็นศูนย์ไป

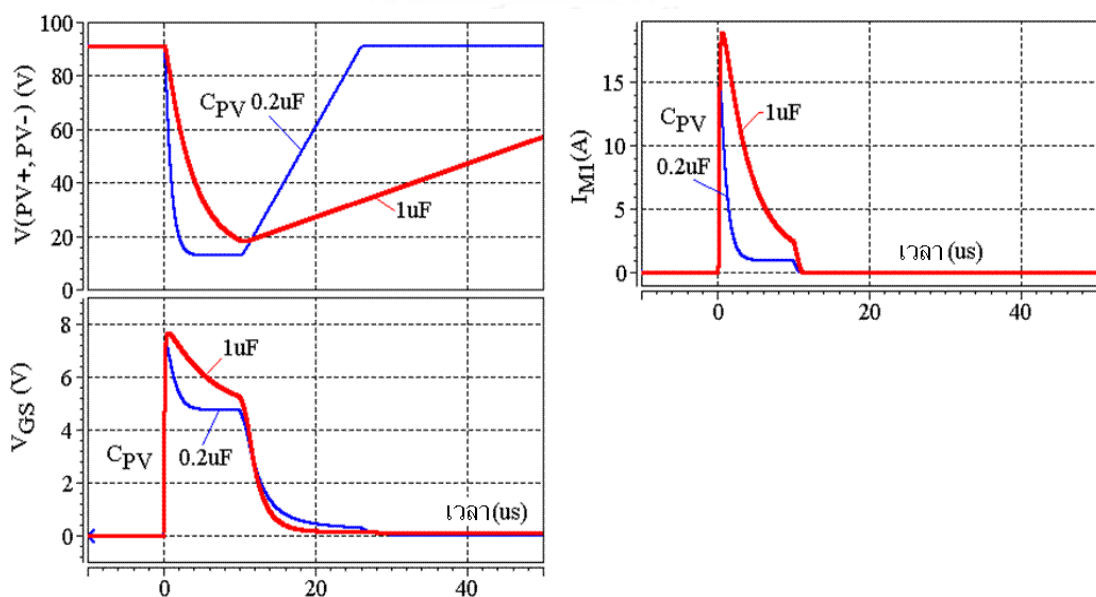
8.5 วงจรสวิตช์สำหรับสร้างพัลส์



รูปที่ 8.7 วงจรสวิตช์สำหรับสร้างพัลส์

วงจรสวิตช์สำหรับสร้างพัลส์ก็คือการใช้ MOSFET M1 มาลัดวงจรแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อให้เกิดสัญญาณพัลส์เท่านั้นเอง ดังนั้น M1 จึงถูกวางคร่อม PV+ และ PV- เพื่อให้กระแสจำนวน มากจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไหลผ่าน M1 เพียงตัวเดียว โดยที่มี Q_{E1} , Q_{E2} เป็นตัวส่งผ่านสัญญาณ การเปิดสวิตช์มาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) ดังรูปที่ 8.7 (ก) ในการทดลองนี้สวิตช์ M1 ใช้ MOSFET ชนิด N เบอร์ IRF630 [47] ซึ่งรับกระแสได้ 9A, $V_{DS} < 200V$, $-30V < V_{GS} < 30V$ และสามารถทนกระแสกระชากได้ 36A ในขณะที่ยังไม่ต้องการให้สวิตช์สร้างพัลส์ R_{E1} , R_{E3} , R_{E5} จะช่วยให้ Q_{E1} , Q_{E2} , M1 ปิดตามลำดับ เมื่อ Q_{E1} , Q_{E2} เปิด V_{GS} ของ M1 จะขึ้นอย่างช้าๆเนื่องจาก R_{E6} และ C_{GS} ของ M1 ช่วยหน่วงไว้ เพื่อป้องกันไม่ให้ V_{GS} ขึ้นมากเกินไป 30V ส่วน R_{E7} มีไว้เพื่อลดขนาดกระแส กระชากจาก C_{PV} ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อ M1 เปิดแบบทันทีทันใด

ในการจำลองการทำงานของวงจรสวิตช์นี้ เพื่อความง่ายจึงจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย ตัวเก็บประจุแบบเชิงเส้นขนาด 0.2 μ F และ 1 μ F ซึ่งน่าจะเพียงพอสำหรับการจำลองการทำงานเพราะ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ในการทดลองจริงมีค่าความจุขณะแสงมืด (C_{J0} , Dark illumination capacitance) เพียงแค่ 65nF เท่านั้น และได้ผลจำลองการทำงานดังรูปที่ 8.8 ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าที่ค่า C_{PV} 1 μ F จะมีกระแสกระชากผ่านสวิตช์ M1 (I_{M1}) มากกว่า C_{PV} 0.2 μ F ส่วนค่า V_{GS} นั้นยังต่ำกว่า 30V ซึ่งเป็นค่าลิมิตบนของสวิตช์ M1 อยู่มาก ส่วนการเปิดสวิตช์เพียง 10 μ s ก็เพียงพอแล้วในการสร้าง พัลส์ถึงแม้ค่า C_{PV} จะมากถึง 1 μ F ก็ตาม นอกจากนี้ในกรณีที่ต้องการสร้างให้เป็นสวิตช์แบบเปิดช้าดัง หัวข้อที่ 6.4 C_C กับ R_G อาจถูกใส่เพิ่มเข้าไปดังรูปที่ 8.7 (ข) ซึ่งจะช่วยลดการสั่นของสัญญาณพัลส์ได้ ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.15



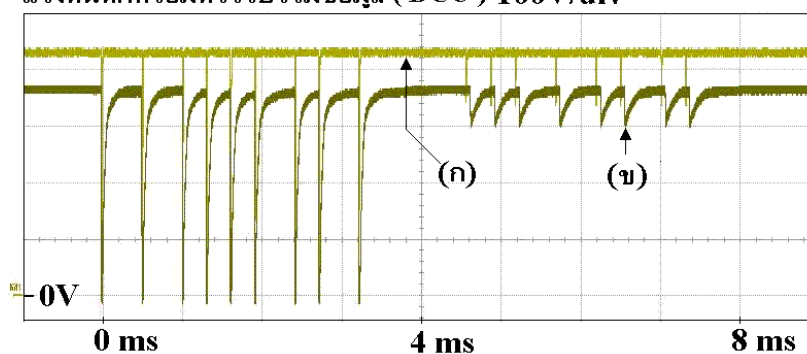
รูปที่ 8.8 ผลการจำลองการทำงานของวงจรสวิตช์สำหรับสร้างพัลส์รูปที่ 8.7(ก)

8.6 ผลการทดลอง



รูปที่ 8.9 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด amorphous silicon ขนาด 50 วัตต์สำหรับใช้ทดลอง

แรงดันตกคร่อมตัวรวบรวมข้อมูล (DCU) 100V/div

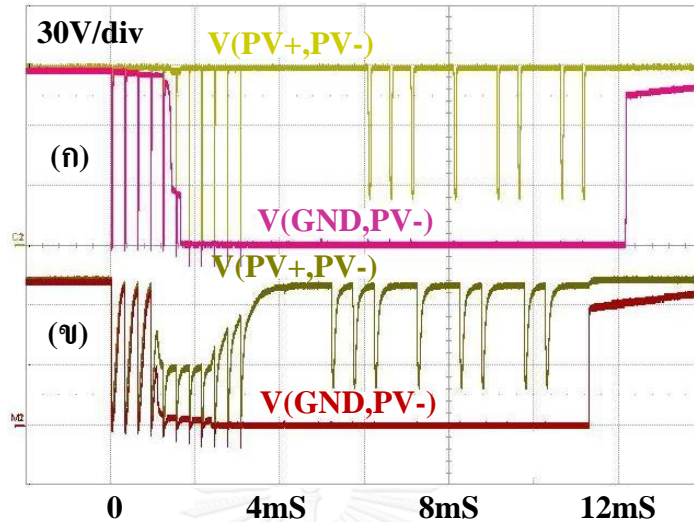


รูปที่ 8.10 สัญญาณพัลส์คร่อมตัวรวบรวมข้อมูล (ก) ภายใต้แสงแดดจ้า (ข) ภายใต้แสงแดดอ่อน

รูปที่ 8.9 แสดงแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด amorphous silicon ขนาด 50 วัตต์สำหรับใช้ทดลองจำนวน 5 แผง แต่ละแผงมี open circuit voltage (V_{OC}) และ short circuit current (I_{SC}) ที่ความเข้มแสง 1000 W/m^2 เป็น 93.4V และ 0.86A ตามลำดับ สัญญาณคร่อมตัวรวบรวมข้อมูลสามารถวัดได้ดังรูปที่ 8.10 ในช่วงเวลาที่ $0 - 4\text{ms}$ ตัวรวบรวมข้อมูลส่งคำสั่งไปหาตัวตรวจวัดตัวหนึ่ง และตัวตรวจวัดตัวนั้นก็ตอบกลับมาในช่วงเวลาที่ $4\text{ms} - 8\text{ms}$ สัญญาณ (ก) ถูกวัดภายใต้แสงแดดจ้า ซึ่งเป็นจุดที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์มี $V_{OC} = 86\text{V}$ และ $I_{SC} = 690\text{mA}$ ส่วนสัญญาณ (ข) ถูกวัดภายใต้แสงแดดอ่อนซึ่งเป็นจุดที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์มี $V_{OC} = 72\text{V}$ และ $I_{SC} = 35\text{mA}$ ซึ่งภายใต้แสงแดดอ่อนนี้สัญญาณพัลส์จะมีขอบขาขึ้นที่ชันมากประมาณ $200\mu\text{s}$

สำหรับอีกรูปหนึ่งเป็นสัญญาณภายในตัวตรวจวัดดังรูปที่ 8.11 ซึ่งแสดงถึงช่วงการตื่นขึ้นของตัวตรวจวัดในระหว่างเวลา $0 - 2\text{ms}$ ช่วงส่งพัลส์กลับไปหาตัวรวบรวมข้อมูลในระหว่างเวลา $5\text{ms} - 11\text{ms}$ และช่วงปิดตัวเองในตอนท้าย สัญญาณ (ก) ถูกวัดภายใต้แสงแดดจ้าซึ่งเป็นจุดที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์มี $V_{OC} = 88\text{V}$ และ $I_{SC} = 700\text{mA}$ ส่วนสัญญาณ (ข) ถูกวัดภายใต้แสงแดดอ่อนซึ่งเป็นจุดที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์มี $V_{OC} = 70\text{V}$ และ $I_{SC} = 29\text{mA}$ สังเกตว่า $V(PV+, PV-)$ ภายใต้แสงแดดอ่อน จะ

ตกลงในตอนที่ตัวตรวจวัดกำลังขึ้น เนื่องจากกระแส I_{PH} 29mA ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ กำลังไหลเข้าไปประจุตัวเก็บประจุ C_{C1} ที่คร่อมแรงดันไฟเลี้ยง 5V อยู่ในรูปที่ 8.2



รูปที่ 8.11 ผลการวัดแรงดันที่โหนด gnd และ PV+ (เทียบ PV-) บนวงจรตัวตรวจวัดดังรูปที่ 8.2

(ก) ภายใต้แสงแดดจ้า (ข) ภายใต้แสงแดดอ่อน

8.7 ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการใช้งานจริง

ในขณะที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อกันแบบอนุกรมดังรูปที่ 8.1 กำลังจ่ายพลังงานอยู่ ตัวรวบรวมข้อมูล (DCU) ซึ่งอยู่ติดกับตัวแปลงแรงดัน DC/DC ก็ยังคงสามารถส่งพัลส์ไปให้ตัวตรวจวัด (MU) ได้ เพราะว่ามีไดโอด D_{BK} ช่วยป้องกันกระแสไหลย้อนกลับจากตัวแปลงแรงดัน DC/DC แต่ที่ส่งกลับมาจากตัวตรวจวัดจะมาถึงตัวรวบรวมข้อมูลได้ไม่ค่อยดีนัก ตัวอย่างเช่นมีแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 5 แผงต่อกันแบบอนุกรม แต่ละแผงมีแรงดันขณะไม่จ่ายกระแส และขณะจ่ายกระแสเป็น 80V และ 65V ตามลำดับ ดังนั้นแรงดันที่ตกคร่อมตัวรวบรวมข้อมูลขณะจ่ายกระแสก็จะเป็น $65V \times 5 = 325V$ ถ้าแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แผงหนึ่งถูกชอร์ตให้เป็น 0V แรงดันของอีก 4 แผงที่เหลือก็จะเพิ่มกลับขึ้นมาเป็น 80V หรือแรงดันที่ตกคร่อมตัวรวบรวมข้อมูลเป็น $80V \times 4 = 320V$ จึงเป็นผลให้ขนาดพัลส์ที่มาถึงตัวรวบรวมข้อมูลมีขนาดเล็กเกินไป ฉะนั้นแล้วหากเราต้องการวัดแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขณะที่มันกำลังจ่ายกระแสก็ให้ตัวรวบรวมข้อมูลส่งพัลส์คำสั่งไปสั่งให้ตัวตรวจวัดทำการวัดได้ แต่ตอนที่รับผลวัดกลับมาก็ต้องปิดตัวแปลงแรงดัน DC/DC เพื่อให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์หยุดการจ่ายกระแสก่อนจึงจะสามารถรับสัญญาณพัลส์ได้

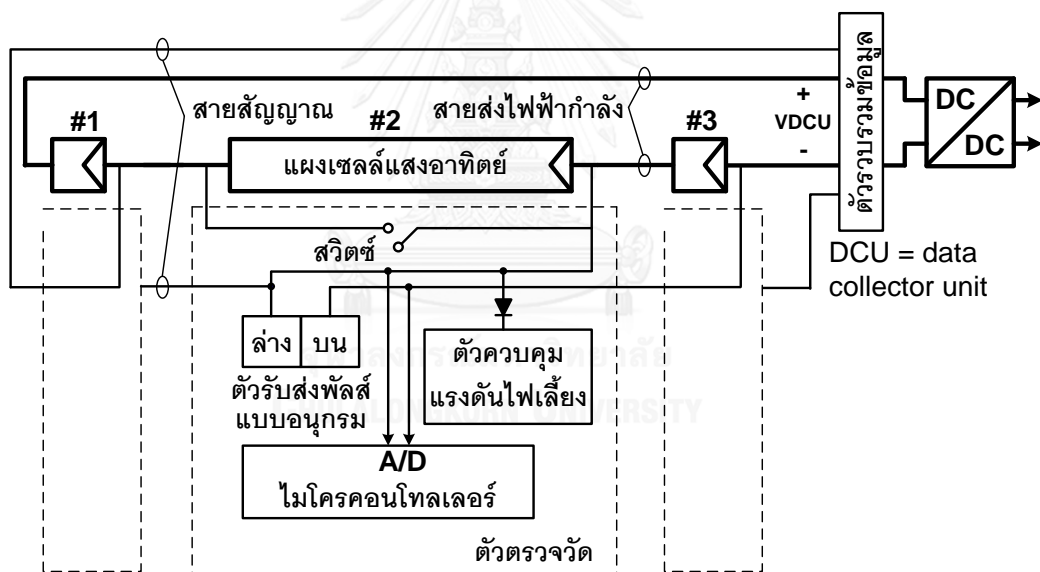
บทที่ 9

การปรับปรุงโครงสร้างของระบบตรวจวัดซึ่งใช้การสื่อสารผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลัง ด้วยสัญญาณพัลส์

เมื่อเทียบกับระบบตรวจวัดคุณภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตัวอย่างในหัวข้อ 2.1 และ 2.2 แล้วระบบตรวจวัดในบทที่ 6 หรือบทที่ 8 (รูปที่ 6.1 หรือรูปที่ 8.1) ยังไม่มีความสามารถดังต่อไปนี้

1. ไม่สามารถเรียงลำดับรหัสประจำตัวแบบอัตโนมัติได้
2. ไม่สามารถหาตำแหน่งสายส่งไฟฟ้ากำลังที่ขาดได้ อีกทั้งยังทำการสื่อสารไม่ได้ขณะสายส่งไฟฟ้ากำลังขาด
3. ไม่มีการวัดแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบซ้ำซ้อน เพื่อลดโอกาสเสียของระบบตรวจวัด

9.1 หลักการเบื้องต้นของการสื่อสารด้วยพัลส์ผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลังแบบปรับปรุง



รูปที่ 9.1 โครงสร้างตัวตรวจวัดคุณภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งใช้การสื่อสาร
แบบพัลส์แบบปรับปรุง

เพื่อเพิ่มความสามารถเหล่านี้ โครงสร้างระบบตรวจวัดคุณภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งใช้การสื่อสารแบบพัลส์ดังรูปที่ 9.1 จึงได้ถูกนำเสนอ โครงสร้างนี้ยังคงใช้สายส่งไฟฟ้ากำลัง (เส้นหนา) และสวิตช์คร่อมแผงเซลล์แสงอาทิตย์อยู่เหมือนเดิม แต่จะมีสายสัญญาณเพิ่มขึ้นไปอีก 1 คู่ และมีวงจรรับ-ส่งพัลส์แบบอนุกรมเพิ่มมาด้วย ตัวอย่างเช่น ตัวรับ-ส่งพัลส์แบบอนุกรมตัวบนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ #2 จะสามารถรับและส่งพัลส์ กับ ตัวรับ-ส่งพัลส์แบบอนุกรมตัวล่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ #3 ได้ หรือก็สามารถส่งพัลส์เรียงจากตัวรวบรวมข้อมูล → ตัวตรวจวัดตัวที่ #1

→ ตัวตรวจวัดตัวที่ #2 → ตัวตรวจวัดตัวที่ #3 → ตัวรวบรวมข้อมูลหรือเรียงกลับทิศทางก็ได้ เป็นต้น

ตัวอย่างการใช้งานตัวรับ-ส่งพัลส์แบบอนุกรมเริ่มด้วย ตัวตรวจวัดบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทุกๆตัวจะมีเลขประจำตัว แต่ตอนติดตั้งครั้งแรกตัวรวบรวมข้อมูลจะยังไม่ทราบว่าในระบบของตนมี ตัวตรวจวัดเลขประจำตัวอะไรบ้างและเรียงลำดับก่อนหลังอย่างไร ตัวรวบรวมข้อมูลจะใช้การสื่อสารแบบอนุกรมเรียกตัวตรวจวัดตัวที่ #1 ตัวตรวจวัดตัวที่ #1 ก็จะบอกเลขประจำตัวกลับไปด้วยการส่งพัลส์ด้วยสวิทช์ที่ต่อคร่อมแผงเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ แล้วก็ไปเรียกตัวตรวจวัดตัวที่ #2 ให้ส่งเลขประจำตัวไปให้ตัวรวบรวมข้อมูล ต่อๆกันไปจนครบทั้งหมด

ในกรณีที่สายส่งไฟฟ้ากำลังขาด การสื่อสารด้วยสวิทช์ที่ต่อคร่อมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (หรือการสื่อสารด้วยพัลส์ดังรูปที่ 6.2) ก็จะใช้ไม่ได้ ตัวรวบรวมข้อมูลสามารถใช้การสื่อสารแบบอนุกรมนี้ไล่สื่อสารจากตัวที่ #1 ขึ้นไป (หรือจากตัวที่ #3 ลงมาก็ได้) ถ้าสื่อสารต่อขึ้นไป (หรือต่อลงมา) ไม่ได้ ณ จุดใดก็เป็นการบอกโดยนัยว่าสายส่งพลังงานไฟฟ้าขาด ณ จุดนั้น

โดยสรุปแล้วโครงสร้างดังรูปที่ 9.1 นี้สามารถแบ่งการสื่อสารด้วยสัญญาณพัลส์ได้เป็น 3 แบบ คือ

1. การสื่อสารแบบอนุกรมขาขึ้นจาก ตัวรวบรวมข้อมูล (DCU) → ตัวตรวจวัดตัวที่ #1 → ตัวตรวจวัดตัวที่ #2 → ตัวตรวจวัดตัวที่ #3 → ตัวรวบรวมข้อมูล (DCU)
2. การสื่อสารแบบอนุกรมขาลงจาก ตัวรวบรวมข้อมูล (DCU) → ตัวตรวจวัดตัวที่ #3 → ตัวตรวจวัดตัวที่ #2 → ตัวตรวจวัดตัวที่ #1 → ตัวรวบรวมข้อมูล (DCU)
3. การสื่อสารผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลังด้วยสวิทช์ในรูปที่ 9.1 ซึ่งต่อคร่อมแผงเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ เหมือนกับในหัวข้อ 6.1 เดิม

นอกจากนี้ สายสัญญาณเพิ่มขึ้นมาอีก 1 คู่นี้ ยังทำให้ตัวตรวจวัดตัวที่ #2 สามารถวัดแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ #3 ได้อีกด้วย หรือก็คือตัวตรวจวัดใดๆจะสามารถวัดแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตัวบนที่อยู่ถัดจากมันได้นั่นเอง จึงเป็นการตรวจวัดแบบซ้ำซ้อนเพื่อลดโอกาสเสียของการตรวจวัดดังจะกล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 9.4

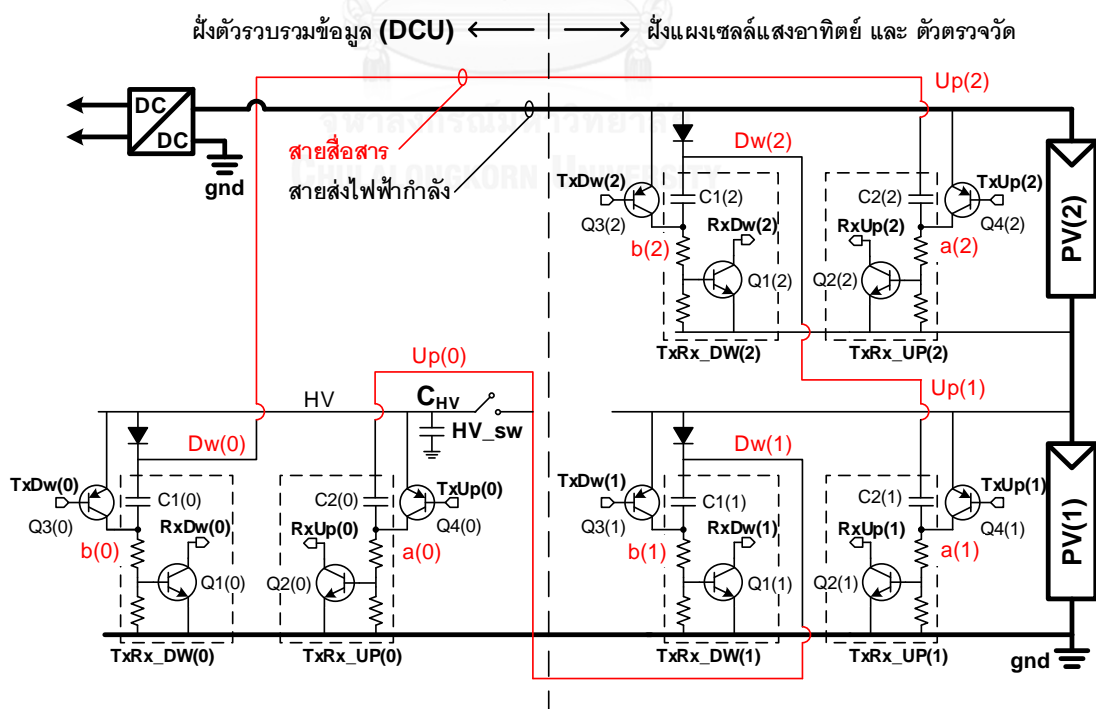
9.2 วงจรรับ-ส่งสัญญาณพัลส์แบบอนุกรม

จากรูปที่ 9.1 ส่วนประกอบหลักที่เพิ่มขึ้นจากบทที่ 6 (หรือบทที่ 8) ก็คือ วงจรรับ-ส่งสัญญาณพัลส์แบบอนุกรมนั่นเอง วงจรรับสัญญาณพัลส์นี้เป็นวงจรคล้ายๆกับวงจรรับสัญญาณพัลส์ในหัวข้อที่ 8.2 แต่มีการเพิ่มสวิทช์เข้าไปเพื่อให้ส่งสัญญาณพัลส์ไปยังตัวตรวจวัดตัวข้างๆได้ ตัวอย่างวงจรในรูปที่ 9.2 ประกอบด้วย ตัวรวบรวมข้อมูล (0)1 ตัว และแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับตัวตรวจวัด (1), (2) ที่ต่ออนุกรมกันอีก 2 แผง ตัวตรวจวัดแต่ละตัวจะมีวงจรรับส่งสัญญาณพัลส์ 2 ตัวใช้แยกรับส่ง

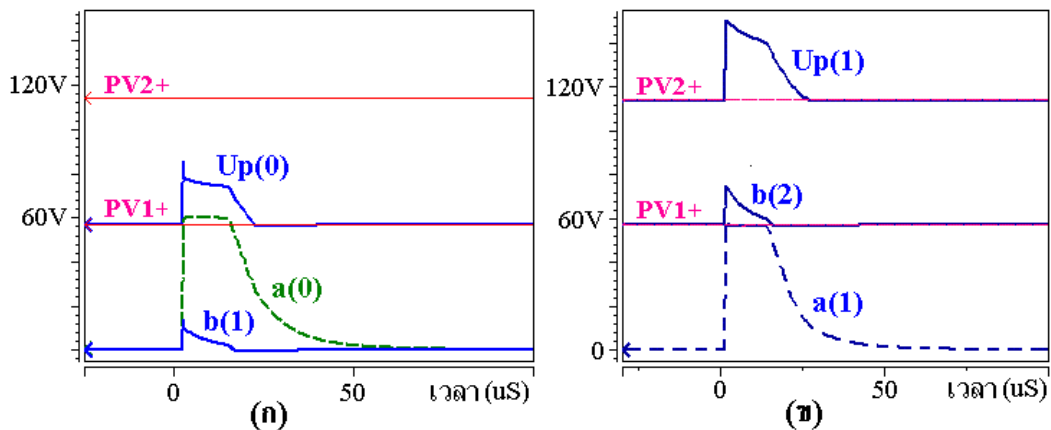
สัญญาณพัลส์จากข้างบน (TxRx_UP) และข้างล่าง (TxRx_DW) และมีโหนด Up(0) ต่อกับ Dw(1), โหนด Up(1) ต่อกับ Dw(2) และโหนด Up(2) ต่อกับ Dw(0)

ตัวอย่างต่อไปนี้จะถูกใช้เพื่อประกอบคำอธิบายการส่งสัญญาณพัลส์ขาขึ้นจาก ตัวรวบรวมข้อมูล (0) → ตัวตรวจวัดตัวที่ (1) → ตัวตรวจวัดตัวที่ (2) → ตัวรวบรวมข้อมูล (0) โดยมีขั้นตอนการทำงานของวงจรดังนี้

1. ณ จุดทำงานสงบที่ C1(0), C1(1), C1(2), C2(0), C2(1), C2(2) ในตัวรวบรวมข้อมูล (0) และตัวตรวจวัดทุกๆตัว (1), (2) มีแรงดันตกคร่อมเท่ากับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ V_{PV}
2. แรงดันที่โหนด a(0), a(1), a(2), b(0), b(1), b(2) เป็นศูนย์โวลต์หรือเท่ากับขั้วลบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้ Q1(0), Q1(1), Q1(2), Q2(0), Q2(1), Q2(2) อยู่ในสถานะหยุดนำกระแส (turn-off)
3. Q3(0), Q3(1), Q3(2), Q4(0), Q4(1), Q4(2) ก็อยู่ในสถานะหยุดนำกระแสด้วย
4. สวิตช์ HV_sw ถูกเปิดและนำกระแสจาก PV(1) มาประจุ C_{HV} จนเต็ม
5. เริ่มการทำงานโดยการปิดสวิตช์ HV_sw แล้วเปิด Q4(0) ทำให้แรงดันที่โหนด a(0) เปลี่ยนจากศูนย์โวลต์เป็น V_{PV1} ทันทีดังรูปที่ 9.3 (ก) แรงดันที่โหนด Up(0) หรือ Dw(1) จะขึ้นสูงกว่า V_{PV1} และแรงดันที่โหนด b(1) ขึ้นสูงกว่าศูนย์โวลต์ จึงเป็นผลให้ Q1(1) เปิดนำกระแสเป็นช่วงเวลาสั้นๆซึ่งแสดงถึงการส่งสัญญาณพัลส์จากตัวรวบรวมข้อมูล (0) ไปยังตัวตรวจวัดตัวที่ (1)



รูปที่ 9.2 วงจรอย่างง่ายเพื่อประกอบคำอธิบายการส่งสัญญาณพัลส์แบบอนุกรม



รูปที่ 9.3 สัญญาณในวงจรอย่างง่ายรูปที่ 9.2

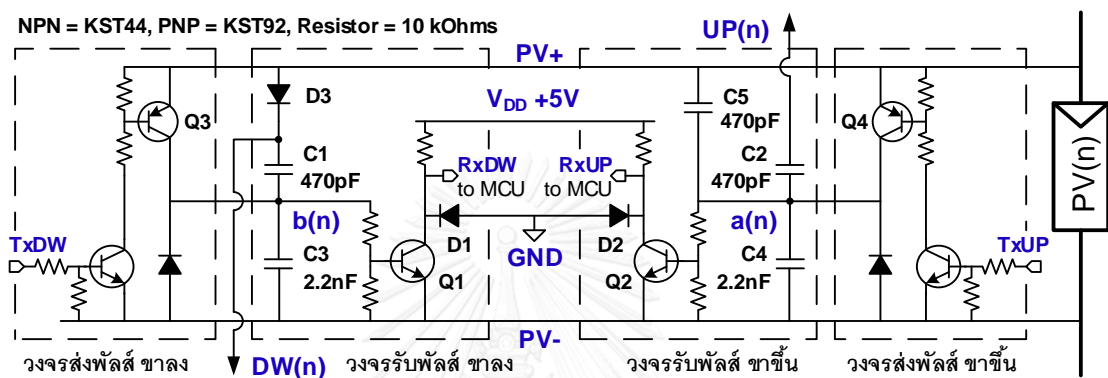
ขณะที่ (ก) ตัวรวบรวมข้อมูล (0) เปิด Q4(0) เพื่อส่งพัลส์ไปเปิด Q1(1) ในตัวตรวจวัด (1)

(ข) ตัวตรวจวัด (1) เปิด Q4(1) เพื่อส่งพัลส์ไปเปิด Q1(2) ในตัวตรวจวัด (2)

6. เมื่อตัวตรวจวัดตัวที่ (1) ได้รับขบวนสัญญาณพัลส์จำนวนหนึ่ง ไมโครคอนโทรลเลอร์ของตัวตรวจวัดตัวที่ (1) ก็จะตื่นขึ้นด้วยกลไกการทำงานที่เหมือนกับหัวข้อ 8.1
7. ตัวรวบรวมข้อมูล (0) หยุดการส่งพัลส์ประมาณ 4ms เพื่อรอให้การตั้งค่าต่างๆภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ของตัวตรวจวัดตัวที่ (1) เสร็จพร้อมใช้งาน
8. ตัวตรวจวัดตัวที่ (1) ที่ตื่นแล้ว จะส่งสัญญาณพัลส์กลับมาบอกตัวรวบรวมข้อมูล (0) ด้วยการการเปิด Q3(1) ทำให้แรงดันที่โหนด b(1) เปลี่ยนจากศูนย์โวลต์เป็น V_{PV1} ทันที ทำให้แรงดันที่โหนด a(0) ขึ้นสูงกว่าศูนย์โวลต์ จึงเป็นผลให้ Q2(0) เปิดนำกระแสเป็นช่วงเวลาสั้นๆซึ่งแสดงถึงการส่งสัญญาณพัลส์กลับไปบอกตัวรวบรวมข้อมูล (0) เป็นรหัสเลขฐานสองชุดหนึ่งว่า ตัวตรวจวัดตัวที่ (1) ได้ตื่นแล้ว
9. จากนั้นตัวตรวจวัดตัวที่ (1) ก็จะส่งขบวนพัลส์ไปยังตัวตรวจวัดตัวที่ (2) ด้วยการเปิด Q4(1) ซึ่งทำให้ Q1(2) เปิดนำกระแสเป็นช่วงเวลาสั้นๆดังสัญญาณในรูปที่ 9.3 (ข) และเหตุการณ์ระหว่างตัวตรวจวัดตัวที่ (1) กับ (2) ก็จะดำเนินต่อไปดังขั้นตอนที่ 6 – 8
10. ในกรณีที่ตัวตรวจวัดตัวที่ (2) ไม่ตอบกลับมาบอกสถานะการตื่นของตนให้กับตัวตรวจวัดตัวที่ (1) ตัวตรวจวัดตัวที่ (1) ก็จะส่งรหัสเลขฐานสองชุดหนึ่ง กลับไปบอกตัวรวบรวมข้อมูล (0) เป็นต้น

ในทางกลับกันวงจรตัวอย่างดังรูปที่ 9.2 นี้ สามารถส่งสัญญาณพัลส์ขาลงจาก ตัวรวบรวมข้อมูล (0) → ตัวตรวจวัดตัวที่ (2) → ตัวตรวจวัดตัวที่ (1) → ตัวรวบรวมข้อมูล (0) ได้ด้วย ยิ่งไปกว่านั้น การสื่อสารแบบอนุกรมนี้ต่างจากการสื่อสารด้วยสัญญาณพัลส์ดังรูปที่ 6.2 ตรงที่ไม่มีกรลัดวงจรแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จึงทำให้สูญเสียพลังงานในการสื่อสารน้อยกว่า นอกจากนี้ ดังที่ได้บรรยายไว้ในหัวข้อที่ 8.7 ในขณะที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังไฟฟ้าการสื่อสารด้วยสัญญาณพัลส์จากตัวตรวจวัดถึงตัวรวบรวมข้อมูลจะไม่ค่อยมีประสิทธิภาพ แต่การสื่อสารแบบอนุกรมนี้สามารถใช้

งานได้เป็นปกติ ดังนั้นการสื่อสารแบบอนุกรมนี้จึงถูกใช้เป็นช่องทางสื่อสารหลัก แล้วเก็บการสื่อสารแบบพัลส์เดิมไว้เป็นช่องทางสำรอง ตัวอย่างเช่น ถ้าสายสื่อสารระหว่างตัวตรวจวัดตัวที่ (1) และ (2) ขาด และตัวตรวจวัดตัวที่ (4) เสียเราจะไม่สามารถเข้าถึงตัวตรวจวัดตัวที่ (2) และ (3) ได้ อีกทั้งอาการเสียเหล่านี้อาจจะไม่ถูกซ่อมแซมถ้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ยังจ่ายพลังงานได้ตามปกติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่ยากจะเข้าถึง อย่างเช่นภายนอกอาคารสูง ฉะนั้นในกรณีนี้การสื่อสารแบบพัลส์เดิมจึงถูกใช้เพื่อสื่อสารกับตัวตรวจวัดตัวที่ (2) และ (3) เป็นต้น



รูปที่ 9.4 วงจรรับ-ส่งสัญญาณพัลส์ ทั้งขาขึ้นและขาลง

วงจรรับสัญญาณพัลส์แบบสมมาตรเป็นดังรูปที่ 9.4 กราวด์ของวงจร (GND) ถูกแยกกับโหนด (PV-) เพื่อให้หลังจากการปิดตัวเองของตัวตรวจวัดจะไม่กินกำลังไฟฟ้าเลย (Zero standby power) และวิธีการทำงานของวงจรรับสัญญาณพัลส์ก็ยังคงเหมือนกับวงจรในรูปที่ 8.2 (หัวข้อที่ 8.1) ด้วยเพียงแต่แยกออกเป็นวงจรรับพัลส์ขาขึ้นและขาลงเท่านั้น สำหรับอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลก็ขึ้นอยู่กับค่าอุปกรณ์ซึ่งสำหรับวงจรรีนี้ก็ควรจะไม่เกิน $1/(2.2 \cdot C3 \cdot (R2+R3)) \approx 10k$ พัลส์ต่อวินาที (เลข 2.2 ประมาณได้จากวงจรกรองผ่านต่ำชนิด RC เมื่อแรงดันคร่อม C มีขนาดสัญญาณเปลี่ยนจาก 10% เป็น 90% ในขณะที่สัญญาณขาเข้าที่ R เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมที่มีความชันสูงมาก)

การรับสัญญาณพัลส์มี 3 แบบคือ

- วงจรรับพัลส์ขาลงรับพัลส์จาก PV(n-1) ที่โหนด DW(n) ผ่านเข้าทาง C1 เพื่อมาเปิดสวิตช์ Q1
- วงจรรับพัลส์ขาขึ้นรับพัลส์จาก PV(n+1) ที่โหนด UP(n) ผ่านเข้าทาง C2 เพื่อมาเปิดสวิตช์ Q2
- วงจรรับพัลส์ขาขึ้นมี C5 ไว้เพื่อรับพัลส์ในกรณีที่สวิตช์ของตัวรวบรวมข้อมูลส่งพัลส์มาซึ่ง C5 นี้ก็คือ C_{A1} ของวงจรในรูปที่ 8.4 นั่นเอง

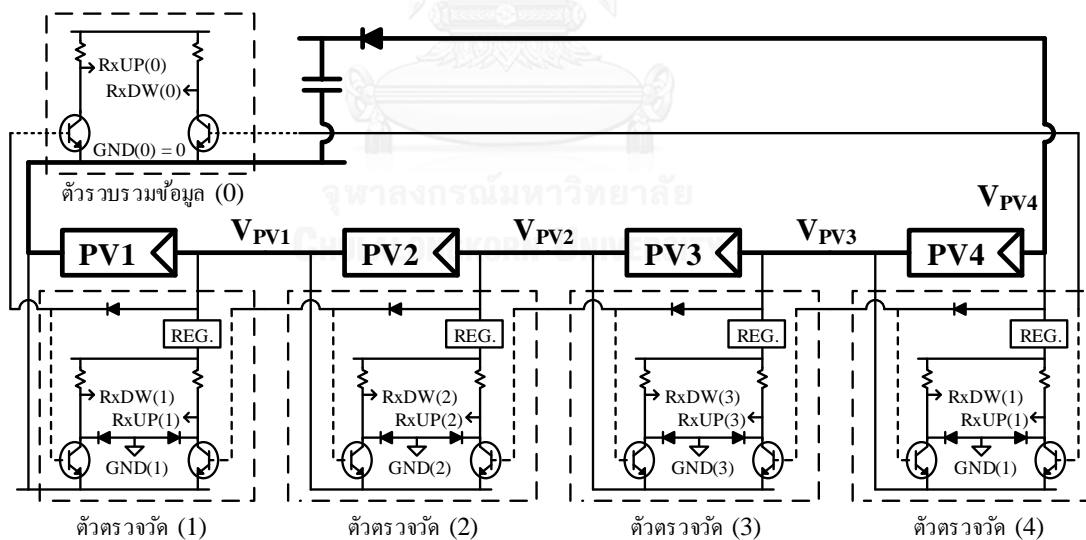
ส่วนการส่งสัญญาณพัลส์ก็มี 3 แบบเช่นกัน คือ

- ส่งสัญญาณพัลส์ขาลงไป PV(n-1) ด้วยการเปิดทรานซิสเตอร์ Q3 ผ่านช่องทาง C1
- ส่งสัญญาณพัลส์ขาขึ้นไป PV(n+1) ด้วยการเปิดทรานซิสเตอร์ Q4 ผ่านช่องทาง C2
- ใช้สวิตช์สร้างสัญญาณพัลส์ดังรูปที่ 8.7 สื่อสารกับตัวรวบรวมข้อมูลเหมือนในบทที่ 8

นอกจากนี้ แรงดันคร่อมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของแผงที่ตัวตรวจวัดติดอยู่ และของแผงถัดไป ก็คือการวัดแรงดันคร่อมโหนด (PV+, GND) และ (UP(n), GND) แล้วแบ่งแรงดันผ่านตัวต้านทานมาเข้า ADC (Analog to Digital Converter) ในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ สำหรับวงจรอื่นๆ อาทิเช่น วงจรควบคุมแรงดันไฟเลี้ยง วงจรเชื่อมต่อกวาดเข้ากับขั้วลบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และวงจรสวิตช์สำหรับสร้างพัลส์ ก็ยังคงเหมือนในบทที่ 8 เช่นเดิม

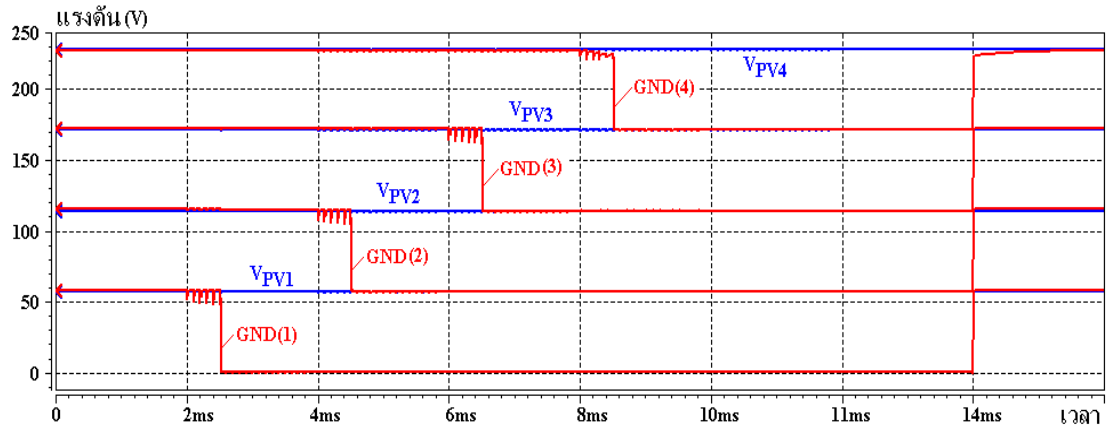
9.3 ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 9.5 แสดงวงจรอย่างง่ายเพื่อประกอบการอธิบายผลการจำลองการทำงาน ซึ่งประกอบด้วย วงจรตัวรวบรวมข้อมูล (0) และแผงเซลล์แสงอาทิตย์พร้อมตัวตรวจวัด (1) ถึง (4) ต่อกันแบบอนุกรม

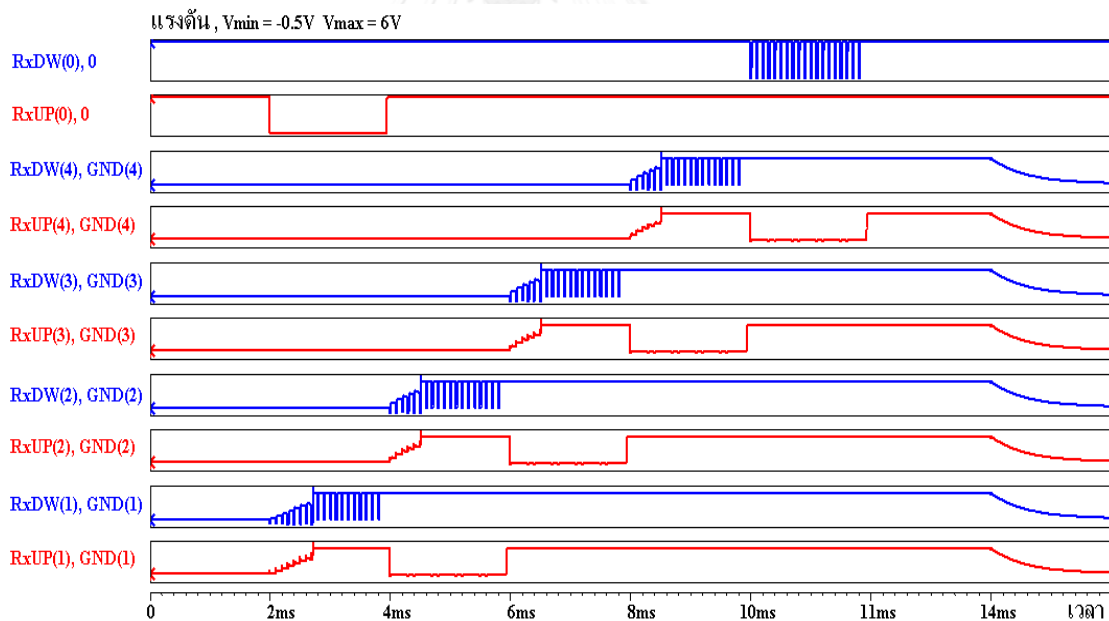


รูปที่ 9.5 วงจรอย่างง่ายเพื่อประกอบการอธิบายผลการจำลองการทำงาน

ในกรณีที่ตัวรวบรวมข้อมูล (0) ใช้การสื่อสารแบบอนุกรมขาขึ้นส่งขบวนพัลส์ไปปลุกตัวตรวจวัดตัวที่ (1) และ (1)→(2), (2)→(3), (3)→(4), (4)→(0) จะได้สัญญาณ GND ภายในตัวตรวจวัดต่างๆเป็นดังรูปที่ 9.6 และสัญญาณ RxDW, RxUP ภายในตัวตรวจวัดต่างๆเป็นดังรูปที่ 9.7

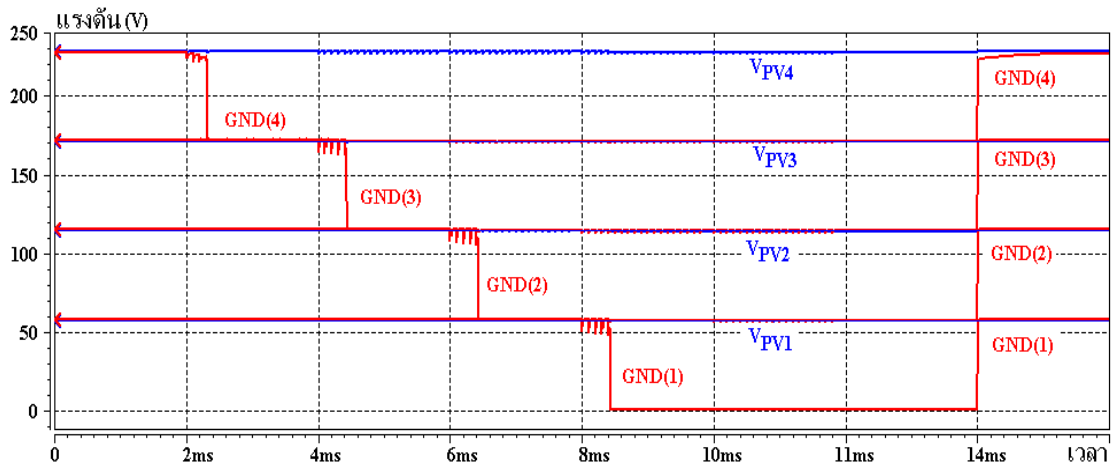


รูปที่ 9.6 ผลการจำลองการทำงานการส่งพัลส์แบบขาขึ้น
จาก (0)→(1),(1)→(2), (2)→(3), (3)→(4), (4)→(0)

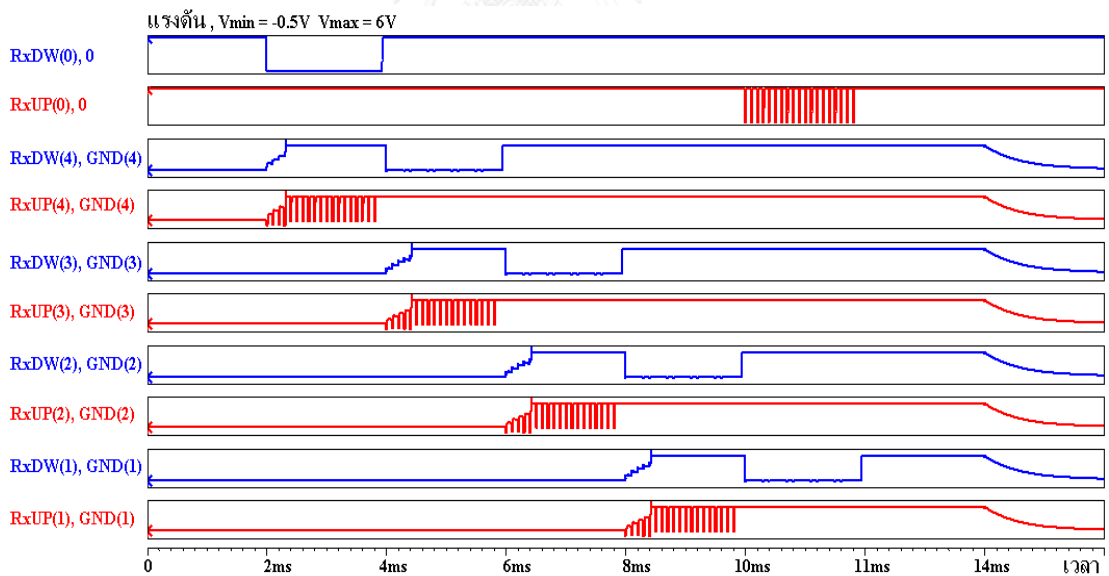


รูปที่ 9.7 ผลการจำลองการทำงานการส่งพัลส์แบบขาขึ้น
จาก (0)→(1),(1)→(2), (2)→(3), (3)→(4), (4)→(0)

ในกรณีที่ตัวรวบรวมข้อมูล (0) ใช้การสื่อสารแบบอนุกรมขาลงส่งขบวนพัลส์ไปปลุกตัวตรวจวัดตัวที่ (4) และ (4)→(3), (3)→(2), (2)→(1), (1)→(0) จะได้สัญญาณ GND ภายในตัวตรวจวัดต่างๆเป็นดังรูปที่ 9.8 และสัญญาณ RxDW, RxUP ภายในตัวตรวจวัดต่างๆเป็นดังรูปที่ 9.9

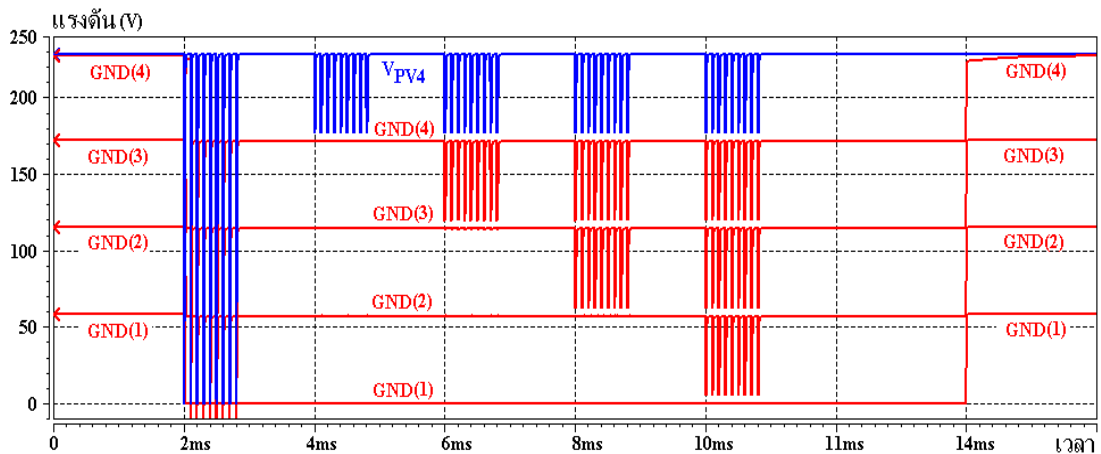


รูปที่ 9.8 ผลการจำลองการทำงานการส่งพัลส์แบบขาลง
จาก (0)→(4),(4)→(3), (3)→(2), (2)→(1), (1)→(0)

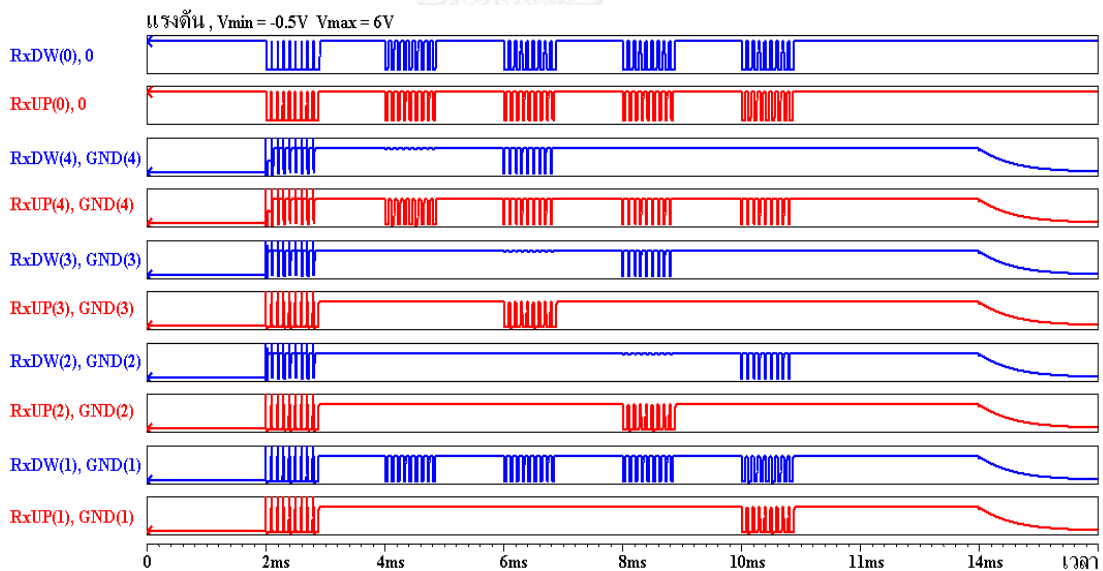


รูปที่ 9.9 ผลการจำลองการทำงานการส่งพัลส์แบบขาลง
จาก (0)→(4),(4)→(3), (3)→(2), (2)→(1), (1)→(0)

ในกรณีที่ตัวรวบรวมข้อมูล (0) ใช้การสื่อสารแบบพัลส์ผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลังดังรูปที่ 6.2 ไปปลุกตัวตรวจวัดทุกๆตัว แล้วตัวตรวจวัดตัวที่ (4), (3), (2), (1) ก็ลัดวงจรเพื่อสร้างพัลส์ตามลำดับ จะได้สัญญาณ GND ภายในตัวตรวจวัดต่างๆเป็นดังรูปที่ 9.10 และสัญญาณ RxDW, RxUP ภายในตัวตรวจวัดต่างๆเป็นดังรูปที่ 9.11



รูปที่ 9.10 ผลการจำลองการทำงานการส่งสัญญาณพัลส์ผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลังจากตัวรวบรวมข้อมูล (0) และ ตัวตรวจวัดตัวที่ (4), (3), (2), (1) ตามลำดับเวลา



รูปที่ 9.11 ผลการจำลองการทำงานการส่งสัญญาณพัลส์ผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลังจากตัวรวบรวมข้อมูล (0) และ ตัวตรวจวัดตัวที่ (4), (3), (2), (1) ตามลำดับเวลา

โดยปกติแล้วถ้าเป็นวงจรดังรูปที่ 6.1 เมื่อตัวตรวจวัดตัวหนึ่งลัดวงจรเพื่อสร้างพัลส์ ตัวตรวจวัดตัวอื่นๆก็จะไม่สามารถรับพัลส์ได้ แต่เนื่องจากวงจรในรูปที่ 9.5 นี้มีการเชื่อมต่อสายสัญญาณ

ที่ความซับซ้อนมากกว่ารูปที่ 6.1 จึงทำให้สัญญาณที่ตัวตรวจวัดตัวหนึ่งส่งไปให้ตัวรวบรวมข้อมูล (0) อาจไปถึงตัวตรวจวัดบางตัวได้ ตัวอย่างเช่นในรูปที่ 9.11 ที่เวลา 4mS ตรวจวัดตัวที่ (4) สร้างพัลส์ แต่ตรวจวัดตัวที่ (1) ก็ยังรับได้ หรือ ที่เวลา 6mS ตรวจวัดตัวที่ (3) สร้างพัลส์ แต่ตรวจวัดตัวที่ (4) และ (1) ก็ยังรับได้ เป็นต้นฉะนั้นเพื่อป้องกันความสับสน การสื่อสารด้วยพัลส์จากตัวตรวจวัดจึงควรมีการระบุว่าจะส่งกลับไปยังตัวรวบรวมข้อมูลด้วย

9.4 การคำนวณโอกาสเสียการตัวตรวจวัด

ตารางที่ 9.1 ตารางแสดง ชนิด จำนวน และค่า MTBF ของอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบตัวตรวจวัดรูปที่ 9.1

ชนิดของอุปกรณ์ในตัวตรวจวัด	จำนวนอุปกรณ์	π_Q	π_s	MTBF (×1000 ปี)				
				20C	35C	55C	75C	AVG
ตัวต้านทานแบบชิปฟิล์มโลหะ RM	20	3		64	55	45.9	39	54.6
ตัวเก็บประจุแบบชิปเซรามิก CDR	7	3	0.3	35	17.6	7.88	3.87	12.1
ตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัม CWR	1	3	0.3	260	195	138	102	184
ซิลิคอนไดโอดแบบสวิตซ์ซิ่ง	6	5.5	0.3	459	274	149	86.6	223
ซิลิคอนไดโอดแบบซิงเส้น	1	5.5	0.3	121	72.2	39	22.8	58.6
NPN/PNP ทรานซิสเตอร์แบบสวิตซ์ซิ่ง 0.1W	6	8	0.3	634	446	294	203	408
NPN/PNP ทรานซิสเตอร์แบบสวิตซ์ซิ่ง 1W	1	5.5	0.3	250	184	127	91.1	172
ซิลิคอน MOSFET 1W	1	1		15	11	7.53	5.37	10.3
ไมโครโปรเซสเซอร์ CMOS 8-bit, 16 ขา SMT	1	2		3.89	2.25	1.09	0.56	1.62
หน่วยความจำ FLOTOX, 2k Byte	1	2		774	280	75.9	23	99.1
วงจรถึงเส้น CMOS 100 ทรานซิสเตอร์	1	2		24.3	14.4	4.83	1.44	5.74

π_Q (Q = quality) คือค่าคงที่ของคุณภาพอุปกรณ์ในเอกสาร MIL-HDBK-217F, ค่ายิ่งน้อยคุณภาพยิ่งดี

π_s (s = stress) ค่าแรงดันใช้ขณะงานหารด้วยค่าแรงดันใช้สูงสุดที่อุปกรณ์รับได้ (Breakdown voltage)

ตามปกติแล้วแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีอายุการใช้งานยาวนานถึง 20 ปีเป็นอย่างน้อย ฉะนั้นระบบหรืออุปกรณ์ใดๆที่จะเอาไปติดกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก็ควรมีการประเมินอายุการใช้งานด้วย ตัวตรวจวัดในรูปที่ 9.1 รวมไปถึงวงจรต่างๆในบทที่ 8 และ 9 สามารถจำแนกเป็นอุปกรณ์ชนิดต่างแล้วนับจำนวนอุปกรณ์ได้ดังตารางที่ 9.1 และจากการคำนวณความน่าเชื่อถือ (Reliability) ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในหัวข้อ 3.2 ด้วยสูตรการคำนวณในเอกสาร MIL-HDBK-217F [16] ในสภาพแวดล้อม “Ground Benign” เราจะได้ค่า MTBF (Mean Time Between Failure) ที่อุณหภูมิ

ต่างๆดังตารางและถ้าสมมติให้ 1 วันมี 4 ชั่วโมงที่ 75C, 3 ชั่วโมงที่ 55C, 3 ชั่วโมงที่ 35C, 14 ชั่วโมงที่ 20C เราจะคำนวณค่าเฉลี่ยของ MTBF ได้ดังนี้

$$\frac{1}{\text{MTBF}_{\text{AVG}}} = \frac{14}{24} \frac{1}{\text{MTBF}_{20\text{C}}} + \frac{3}{24} \frac{1}{\text{MTBF}_{35\text{C}}} + \frac{3}{24} \frac{1}{\text{MTBF}_{55\text{C}}} + \frac{4}{24} \frac{1}{\text{MTBF}_{75\text{C}}} \quad (9-1)$$

ด้วยวิธี Part Count Method ในหัวข้อ 3.2 เราจะสามารถคำนวณ MTBF และโอกาสเสียใน 20 ปีของตัวตรวจวัด (Monitoring unit, MU) ที่ได้ออกแบบดังสมการที่ (9-2) และ (9-3), N_i คือจำนวนอุปกรณ์ชนิด i , i คือชนิดอุปกรณ์เช่น ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ ไดโอด เป็นต้น

$$\frac{1}{\text{MTBF}_{\text{MU}}} = \sum_i \frac{N_i}{\text{MTBF}_{\text{AVG}i}} = \frac{1}{521.8 \text{ years}} \quad (9-2)$$

$$F_{\text{MU}}(t = 20) = 1 - \exp\left(-\frac{20}{\text{MTBF}_{\text{MU}}}\right) = 0.0376 = 3.76\% \quad (9-3)$$

ถึงแม้ว่าโอกาสเสียของตัวตรวจวัดจะสูงถึง 3.76% ใน 20 ปี แต่ระบบตรวจวัดในรูปที่ 9.1 นี้ ตัวตรวจวัดหนึ่งตัวสามารถวัดแรงดันแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ 2 แผง หรือก็คือแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งแผงจะถูกวัดแรงดันด้วยตัวตรวจวัด 2 ตัวจึงเป็นการตรวจวัดแบบซ้ำซ้อนเพื่อลดโอกาสเสียของการตรวจวัด ตัวอย่างเช่น ถ้าโอกาสเสียของตัวตรวจวัดตัวที่ (2) และตัวตรวจวัดตัวที่ (1) เท่ากันเป็น F_{MU} และโอกาสที่สายสื่อสารขาขึ้นจากตัวที่ (1) ไป (2) ขาดคือ $F_w = 0.1\%$ (หรือ $R_w = 0.999$) ฉะนั้นโอกาสที่จะวัดแรงดันคร่อมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ #2 ไม่ได้จะลดลงอย่างมากดังสมการที่ (9-4)

$$F_{\text{MU}}(2) \times [1 - R_{\text{MU}}(1) \cdot R_w] = 0.0376 \times (1 - (1 - 0.0376) \times 0.999) = 0.00145 = 0.145\% \quad (9-4)$$

การคำนวณนี้สมมติให้ความน่าเชื่อถือของสายส่งไฟฟ้ากำลังและแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็น 1 เพราะถ้าอุปกรณ์หลักเหล่านี้เสียก็ต้องถูกซ่อมจนกลับมาใช้งานได้ แต่ถ้าอุปกรณ์ตรวจวัดเสียหรือสายสื่อสารขาด การซ่อมแซมก็อาจถูกละเลยเพราะระบบยังคงจ่ายพลังงานได้อยู่

สุดท้ายนี้ การคำนวณความน่าเชื่อถือดังกล่าวอยู่บนพื้นฐานของการสมมติให้อุปกรณ์ทุกๆตัวมีโอกาสเสียเป็นอิสระต่อกัน (Independent) และเกิดขึ้นแบบสุ่ม (random) รวมไปถึงทฤษฎีและประสบการณ์ตามเอกสาร MIL-HDBK-217F เท่านั้น แต่ก็ยังคงจำเป็นต้องมีการเก็บข้อมูลจากการทดลองใช้งานอีกจำนวนหนึ่งเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ใกล้เคียงความจริงต่อไป

บทที่ 10

บทสรุป

10.1 บทสรุปที่ได้รับจากบทความวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอเทคนิควิธีตลอดจนวงจรอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งติดอยู่กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทุกๆแผง เพื่อเฝ้าสังเกตสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อกันแบบอนุกรมผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลัง โดยใช้วงจรรับส่งพัลส์เป็นแบบง่ายๆจึงทำให้ตัวตรวจวัดมีราคาถูก สามารถปิดตัวเองแบบไม่สูญเสียพลังงานได้ในขณะที่ไม่ถูกใช้งาน และสามารถปลุกให้ตื่นกลับมาทำงานได้ด้วยสัญญาณพัลส์ขนาดใหญ่

การรับส่งสัญญาณพัลส์ที่ได้นำเสนอมี 2 แบบได้แก่ การรับส่งพัลส์ผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลัง และการรับส่งพัลส์แบบอนุกรมโดยต้องใช้สายสัญญาณเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งเส้น เนื่องจากการรับส่งพัลส์ผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลังจะสูญเสียพลังงานมาก อีกทั้งยังใช้สื่อสารในขณะที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์กำลังจ่ายพลังงานได้ไม่ค่อยดีนัก ดังนั้นจึงเลือกใช้การสื่อสารแบบอนุกรมเป็นหลัก และใช้การรับส่งพัลส์ผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลังเป็นระบบสำรองในกรณีที่สายสื่อสารขาด นอกจากนี้สายสัญญาณที่เพิ่มขึ้นอีกหนึ่งเส้นยังทำให้ระบบตรวจวัดสามารถหาจุดที่สายส่งไฟฟ้ากำลังหลวมหรือขาดได้ แล้วยังสามารถทำการตรวจวัดแบบเข้าซ้อนเพื่อลดโอกาสเสียของการตรวจวัดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้อีกด้วย

10.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย

เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ การรับส่งพัลส์ผ่านสายส่งไฟฟ้ากำลังจะมีอัตราการรับส่งข้อมูลต่ำโดยเฉพาะภายใต้สภาพแสงแดดอ่อนซึ่งได้ประมาณ 2 กิโลบิตต่อวินาทีเท่านั้น ส่วนการรับส่งพัลส์แบบอนุกรมน่าจะได้ถึง 10 กิโลบิตต่อวินาทีทั้งภายใต้สภาพแสงแดดแรงและแสงแดดอ่อนแต่ถึงอย่างไรก็ดีการสื่อสารด้วยสัญญาณพัลส์ขนาดใหญ่นี้ก็ยังคงสูญเสียพลังงานในการรับส่งข้อมูลมากกว่าแบบอื่นๆ ดังนั้นถ้ามีข้อมูลที่ต้องการสื่อสารเป็นจำนวนมาก หรือมีการสื่อสารบ่อยครั้งการสื่อสารแบบอื่นๆ อาทิเช่น การสื่อสารแบบไร้สาย (wireless communication network) น่าจะเหมาะสมกว่า

10.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยขั้นต่อไป

นำวงจรรับส่งสัญญาณพัลส์ไปออกแบบร่วมกับ DC/DC convertor แล้วทดลองใช้งานจริงต่อไป หรืออาจจะออกแบบตัวตรวจวัดให้เป็นวงจรรวมจะทำให้ราคาตัวตรวจวัดถูกลง แต่ก็ต้องเลือกการผลิตวงจรรวมที่สามารถทนแรงดันได้ 100V - 200V ด้วย

นอกจากนี้ หากมีกรณีที่สายส่งมีความยาวมากๆ การประมาณอย่างง่ายดังหัวข้อที่ 6.2 ซึ่งประมาณสายส่งที่มีความยาวให้เป็นตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุอาจจะไม่เพียงพอ และอาจต้องการการวิเคราะห์ในเชิงลึกด้วยทฤษฎีคลื่นภายในสายส่ง (transmission line theory) ต่อไป



รายการอ้างอิง

1. Picault, D., B. Raison, and S. Bacha, *Guidelines for evaluating grid connected PV system topologies*, in *Industrial Technology IEEE International Conference*. 2009.
2. Z.Machacek, V.Benda, and D.Busek, *Diagnostics of photovoltaic power plant operating*, in *MIDPOWER IEEE conference* 2010.
3. Spagnolo, G.S., et al., *A Review of IR Thermography applied to PV systems*, in *IEEE conference EEEIC*. 2012.
4. Hasenfus, G.D., *Smart sensors for solar panels*. Jun 4, 2009, US patent: US 2009/0140719 A1.
5. Bennett, J.D. and B.E. Garlick, *Solar panel monitoring system*. Feb 25, 2010, US patent: US 2010/0043780 A1.
6. Gargiulo, M., et al., *A Novel Wireless Self-powered Microcontroller-based Monitoring Circuit for Photovoltaic Panels in Grid-connected Systems*, in *Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM) International Symposium*. 2010.
7. Kawam, E.A. and E.A. Kawam, *Photo-voltaic solar array health monitor*. Dec 11, 2008, US patent: US 2008/0306700 A1.
8. Kumar, S., et al., *Smart device for enabling real-time monitoring, measuring, managing, and reporting of energy by solar panels and method therefore*. Sep 23, 2010, US2010/0241375 A1: US patent.
9. P.Guerriero and V.d'Alessandro, *Effective Real-Time Performance Monitoring and Diagnostics of Individual Panels in PV Plants*, in *Clean Electrical Power conference*. Jun. 2013: Alghero. p. 14-19.
10. Gordon, E., J. Presher, and C.J. Warren, *System and method for monitoring photovoltaic power generation systems*. Jul 27, 2006, US patent: US 2006/0162772 A1.

11. H.Nosato, et al. *A Very Low-Cost Low-Frequency PLC System Based on DS-CDMA for DC Power Lines*. in *Power Line Communications and its Applications IEEE International Symposium*. Mar 2012. Beijing.
12. Jonke, P., et al., *Development of a module integrated photovoltaic monitoring system*, in *IEEE Industrial Electronics Society conference (IECON)*. Nov 2013. p. 8080-8084.
13. Roman, E., et al., *Intelligent PV module for grid-connected PV systems*. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2006. **53**(4): p. 1066-1073.
14. Sánchez-Pacheco, F.J. and P.J. Sotorrio-Ruiz. *Low cost DC lines PLC based Photovoltaic plants parameters smart monitoring communications and control module*. in *Proceedings of the 2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*. May 2011.
15. "Reliability Modeling of Simple Structures" in *MIL-HDBK-338B ELECTRONIC RELIABILITY DESIGN HANDBOOK*, D.o.d.U.S.o. America, Editor. Oct 1988. p. 30-37.
16. *MIL-HDBK-217F, RELIABILITY PREDICTION OF ELECTRONIC EQUIPMENT*, D.o.d.U.S.o. America, Editor. Dec 1991.
17. "Confidence Limits and Intervals", in *MIL-HDBK-338B ELECTRONIC RELIABILITY DESIGN HANDBOOK*, D.o.d.U.S.o. America, Editor. Oct 1988. p. 29 and 37-47.
18. Realini, A., *Mean Time before Failure of Photovoltaic modules*. Jun 2003.
19. *Reliability Handbook, ZETEX semiconductors*. 2004.
20. "Procedure for Failure Rate Prediction With 60% Confidence Level", *Semiconductor Reliability Handbook*. Renesas Electronics Corporation, Apr 2010. rev 1.01, pp.63-72.
21. "Using diodes" in *Star-Hspice Manual, Chapter 13, release 1998.2*. Jul 1998.
22. Lauwaert, J., et al., *A simple correction method for series resistance and inductance on solar cell admittance spectroscopy*. Solar Energy Materials and Solar Cells, ELSEVIER, 2010. **94**: p. 966-970.
23. Scofield, J.H., *Effects of series resistance and inductance on solar cell*. Solar Energy Materials and Solar Cells, ELSEVIER, 1995. **37**: p. 217-233.

24. Ghoneim, A.A., et al., *Analysis of Performance Parameters of Amorphous Photovoltaic Modules under Different Environmental Conditions*. Energy Science and Technology, 2011. **2**(1): p. 43-50.
25. Chayavanich, T., C. Limsakul, and N. Chayavanich, *Voltage and frequency dependent model for PV module dynamic impedance*. available at <http://www.thaiscience.info>.
26. Recartand, F. and A. Cuevas, *Application of Junction Capacitance Measurements to the Characterization of Solar Cells*. IEEE Transactions on electron devices, Mar 2006. **53**(3).
27. Das, A.K. and S. Karmalkar, *Analytical Derivation of the Closed-Form Power Law J-V Model of an Illuminated Solar Cell From the Physics Based Implicit Model*. IEEE transactions on electron devices, Apr 2011. **58**(4).
28. J.A.Gow and C.D.Manning. *Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies*. in *Electric Power Applications - IEE Proceedings*. Mar 1999.
29. Sera, D. and R. Teodorescu, *PV panel model based on datasheet values*, in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*. Jun 2007.
30. Zekry, A. and A.Y. Al-Mazroo, *A distributed SPICE-Model of a solar cell*. IEEE transactions on electron devices, May 1996. **43**(5).
31. "Review of power line communications system emissions standards", InovaTech Limited – PLC Standards. May 2004.
32. Lee, M.K., et al., *HomePlug 1.0 Powerline Communication LANs –Protocol Description and Performance Results version 5.4*. International journal of communication systems, 2000.
33. Hesterman, B., *Analysis and Modeling of Magnetic Coupling*, in *IEEE Power Electronics Society*. Apr 2007.
34. *Inductance calculation by Permeability vs DC Bias Curves*, in *Magnetic power cores*. Chang Sung Corporation, Korea: Available: www.changsung.com. p. 9-13.
35. *Performing Monte Carlo Analysis*, in *Star-Hspice Manual*. Chapter 10, release 1998.2, Jul 1998: p. 39.

36. Roddy, D. and J. Coolen, *Electronic Communication, 4th ed.* 1995, Prentice-Hall international: New Jersey. p. 67-68.
37. Wang, Y. and C. Klumpner, *Optimal Design of a DC/DC Converter for Photovoltaic Applications*, in *IEEE Industrial Electronics Society (IECON), 31st Annual Conference* Nov 2005.
38. Huang, Y. and K. Boyle, *"Two-wire transmission line" in Antennas from theory to practice, 1st ed.* 2008, Singapore: John Wiley and Sons.
39. Kang, I.H., et al., *Accurate Extraction Method of Reverse Recovery Time and Stored Charge for Ultrafast Diodes*. *IEEE transactions on power electronics*, Feb 2012. **27**(2).
40. Huang, Y. and K. Boyle, *Terminated Transmission Line*, in *Antennas from theory to practice, 1st ed.* 2008, John Wiley and Sons: Singapore. p. 32.
41. Paul, C.R., *The Spectrum of Trapezoidal Waveforms*, in *introduction to electromagnetic compatibility, 2nd ed.* 2006, John Wiley & Sons: USA. p. 118-124.
42. Galluzzo, A., et al., *Switching characteristic improvement of modern gate controlled devices*, in *5th European conference on Power Electronics and Applications*. 1993. p. 374-379.
43. Hefner, A.R., *An investigation of the drive circuit requirements for the power insulated gate bipolar transistor (IGBT)*. *IEEE transactions on power electronics*, Apr 1991. **6**(2).
44. Park, S. and T.M. Jahns, *Flexible dv/dt and di/dt control method for insulated gate power switches*. *IEEE transactions on industry applications*, Jun 2003. **39**(3).
45. Rowell, D., *Time-Domain Solution of LTI State Equations*, in *Analysis and Design of Feedback Control Systems*. Oct 2002: available at <http://web.mit.edu/2.14/www/Handouts/StateSpaceResponse.pdf>.
46. Gray, P.R., et al., *Small-Signal Models of MOS Transistors*, in *Analysis and design of analog integrated circuits, 4th ed.* 2001, John wiley and sons: USA. p. 49-57.
47. *IRF630 datasheet, Rev.A, Fairchild Semiconductor*. Oct 2001.

48. *FQP7N80 datasheet, Rev.A, Fairchild Semiconductor. Apr 2000.*





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างโปรแกรม MATLAB สำหรับทำ curve fitting เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ l_{pH} , l_0 , n , R , r_s

```

clear
Vpv_mea = [58.8 58.2 57.5 56.9 56.3 55.5 54.8 53.7 53.3 52.8 51.7 48.9 45.1 41.5 36.8
30.2 26.9 19.9 16.9 14.4 11.4 4.3 3.2];
lpv_mea = [0 0.05 0.11 0.15 0.19 0.25 0.29 0.36 0.39 0.42 0.47 0.59 0.69 0.75 0.8 0.84
0.86 0.89 0.9 0.91 0.92 0.93 0.934];
Ppv = Vpv_mea.*lpv_mea; figure(1); plot(lpv_mea, Vpv_mea, 'b', lpv_mea, Ppv, 'r');
grid on;
x = [0.9 165 270 500 2.7];
option2 = optimset('TolX',1e-12,'TolFun',1e-10,'TolCon',1e-11,'Diagnostics','on');
x = lsqcurvefit(@PV_eq2, x, lpv_mea, Vpv_mea, [0.65 1 100 100 1], [1.1 1000 400 2000
10], option2)
Vpv = PV_eq2(x,lpv_mea); figure(2); plot(lpv_mea, Vpv_mea, 'bx', lpv_mea, Vpv, 'r');
grid on;
function FVpv = PV_eq2(x,lpv)
    ls = x(1);
    lo = x(2)*1e-6;
    n = x(3);
    R = x(4);
    r = x(5);
    options = optimset('Display','off');
    for i = 1:length(lpv)
        FVpv(i) = fsolve(@(Vpv) lo*exp((Vpv+lpv(i)*r)/n/25.9e-3)+Vpv/R+lpv(i)*(1+r/R)-ls-lo, 5,
options);
    end

```

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างโปรแกรม MATLAB สำหรับคำนวณค่า Eigenvalue ของวงจรสวิตช์แบบเปิดซ้ำ

```

clear
Lg = 20e-9 ; Rg = 560 ;Lc = 20e-9 ; Cc = 150e-12 ; Rc = 0.1 ;
%% PV panel load
%LL = 0.8e-6 ; CL = 92.5e-9 ; RL = 2.82 ; Ri = 1500 ; Cd2 = 470e-12 ;
% Cg = 550e-12 ; Cd = 75e-12 ; Cgd = 15e-12 ; gm = 7 ; % at 4.5A, IRFS630
%% PV string load
LL = 31e-6 ; CL = 92.5e-9/8 ; RL = 2.82*8 ; Ri = 560 ; Cd2 = 220e-12+263e-12 ;
Cg = 1420e-12 ; Cd = 150e-12 ; Cgd = 19e-12 ; gm = 5 ; % at 3.3A, FQP7N80
SW = 0.1:0.1:15 ;
for i=1:length(SW)
gm = SW(i) ;
G = zeros(7,7) ;
G(1,1) = Cg+Cgd ; G(1,2) = -Cgd ; G(2,1) = -Cgd ; G(2,2) = Cd+Cd2+Cgd ;
G(3,3) = Cc ; G(4,4) = CL ; G(5,5) = Lg ; G(6,6) = Lc ; G(7,7) = LL ;
H = zeros(7,7) ;
H(1,5) = 1 ; H(2,:) = [-gm 0 0 0 0 -1 -1] ; H(3,6) = 1 ; H(4,7) = 1 ;
H(5,:) = [-1 0 0 0 -Rg-Ri Ri 0] ; H(6,:) = [0 1 -1 0 Ri -Rc-Ri 0] ;
H(7,:) = [0 1 0 -1 0 0 -RL] ; Lamda = eig(inv(G)*H) ;
ap = real(Lamda) ; fr = imag(Lamda)/(2*pi) ;
Xdata = [ ap(1),ap(2),ap(3),ap(4),ap(5),ap(6),ap(7)] ;
Ydata = [ fr(1),fr(2),fr(3),fr(4),fr(5),fr(6),fr(7)] ;
figure(1) ; plot(Xdata,Ydata,'b.') ; AXIS(100e6*[-3 3 -1.5 1.5]) ; grid on ; hold on ;
end

```

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

จบการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต และ วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปี 2544 2546 และ 2557 ตามลำดับ

ได้รับรางวัลชนะเลิศระดับนิสิตนักศึกษาประเภทออกแบบวงจรแอนาล็อก ในการประกวดการออกแบบวงจรรวมแห่งประเทศไทยครั้งที่ 2 ในปี 2544 ; ได้รับรางวัลประกาศเกียรติคุณ (Honourable Mention) พิธีโอลิมปิกระหว่างประเทศครั้งที่ 28 ที่ประเทศแคนาดาในปี 2540

International patents : P.Sirinamaratana, K. Opasjumruskit, “Charge - pump circuit for improving read distance”, WIPO, WO/2013/038226, A method to improve reading distance for HDX low frequency RFID transponder (1 3 4 . 2 kHz) ; P.Sirinamaratana, K. Opasjumruskit, “System devices circuits and methods for communicating in a communication system”, WIPO, WO/2012/128732, A method to improve reading distance for FDX low frequency RFID transponder

Articles : "A series DC power line communication and its application to monitoring photo-voltaic strings," Journal of Circuits Systems and Computers, vol. 22, no. 9, Nov. 2013 ; “Development of power line communication circuit for solar farm monitoring”, iEECON, 2014 ; “Circuits for Data Communication through DC Power Line in Solar Farm,” in IEEE EDSSC conf., 2013, pp.1-2 ; “Communication circuit for series connected solar panels”, in IEEE EDSSC conf., 2012, pp.1-2 ; “A 0.7-um CMOS anti-aliasing filter for non-oversampled video signal applications” ISCAS, 2003

ทำงานที่บริษัท ซิลิคอนกราฟเทคโนโลยี จำกัด ซึ่งเป็นบริษัทออกแบบวงจรรวมบริษัทแรกของประเทศไทยตั้งแต่เริ่มต้นก่อตั้งบริษัท (2546) จนถึงปัจจุบัน มีความสามารถด้านการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ อาทิเช่น Analog/Digital IC design, Analog discrete design, Embedded system, IC testers, RF transmitters, Crypto engines, VHDL, MATLAB, Visual basic