

วงจรรอาร์คสตาร์ทสำหรับเครื่องเชื่อมชนิดลวดแข็งตัน  
ARC IGNITION FOR SOLID WIRE WELDING MACHINE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ KMITL-2023-EN-M-027-142 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ARC IGNITION FOR SOLID WIRE WELDING MACHINE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING  
SCHOOL OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2023

KMITL-2023-EN-M-027-142

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

วงจรรีเลย์สำหรับเครื่องเชื่อมชนิดลวดแข็งตัน

ชื่อนักศึกษา

นายสมพร มะหะหมัด

รหัสประจำตัว

63601071

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

พ.ศ.

2566

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.ดร. อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอเกี่ยวกับจุดเริ่มต้นการเชื่อมเหล็กบนเครื่องเชื่อมชนิดที่เป็นอินเวอร์เตอร์แบบลวดแข็งตัน เพราะเหล็กก่อนที่จะเตรียมทำการเชื่อมนั้นตัวเหล็กเองจะอยู่ในอุณหภูมิที่เย็น เวลาเชื่อมเหล็กที่จุดเริ่มต้นเชื่อมโดยไม่มีวงจรถูกช่วยในการเชื่อมนั้นแนวซิมลิกอาจจะยังไม่ดีพอหรือซิมลิกไม่ดีเลย ฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงได้มีการนำเสนอวงจรถูกช่วยมาควบคุมแรงดันในการอาร์คสตาร์ท มาช่วยให้จุดเริ่มต้นเชื่อมมีการซิมลิกที่ดี โดยใช้หลักการของการชาร์จประจุไฟฟ้าและคายประจุไฟฟ้าของวงจรถูกควบคุมแรงดันอาร์คสตาร์ท และมีสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นตัวเปิด-ปิดวงจรถูกควบคุมแรงดันเอาท์พุทของเครื่องเชื่อมอินเวอร์เตอร์ที่เป็นชนิดลวดแข็งตันถ่ายเทกระแสพลังงานขึ้นงานขณะเริ่มต้นเชื่อมเพิ่มขึ้นอีก และมีผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรรีเลย์ที่ขงวงจรรีเลย์เริ่มต้นทำงานมาประกอบการทำงานของวงจรถูกช่วยโดยใช้โปรแกรม OrCAD PSpice ในการซิมมูลชัน และเมื่อได้ผลที่ถูกต้องแล้วก็สามารถนำผลที่ได้ไปออกแบบอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์อาร์คสตาร์ทเพื่อนำไปทดลองงานจริงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	ARC IGNITION FOR SOLID WIRE WELDING MACHINE
Student	Mr. Somporn Mahamad
Student ID.	63601071
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical and Computer Engineering
Year	2023
Thesis Advisor	Asso.Prof. Dr. Anuwat Jangwanitlert

## ABSTRACT

This Thesis presents the arc ignition of welding machine that is an inverter using solid wire. The workpiece is cool before welding. While welding without arc ignition circuit, the penetration of welding is bad or worse. Therefore, this paper presents the voltage control of arc ignition circuit for the help of arc start point for good penetration. Based on the charge and discharge, the voltage is controlled by arc ignition circuit with power semiconductor switches. In addition, the controlled voltage is increased while starting to weld by using solid wire. The simulation result of arc ignition circuit is considered and designed by using OrCAD PSpice program. When the simulation results are corrected, the actual hardware of arc ignition is designed and implemented.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์จะสำเร็จมิได้ถ้าปราศจากความช่วยเหลือของอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ ที่ช่วยให้คำแนะนำในแก้ไขปัญหาทั้งทางด้านแนวคิดและด้านเทคนิคต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดจนการเขียนบทความวิชาการ

ข้าพเจ้าขอขอบคุณคุณอาจารย์และบุคลากร ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ช่วยสอนวิชาความรู้และวิธีการทางภาคปฏิบัติต่าง ๆ ตลอดมา

ขอขอบคุณน้อง ๆ ร่วมรุ่นภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่คอยช่วยเหลือสนับสนุนคำแนะนำและการแก้ไขเทคนิคการค้นคว้างานด้านวิชาการต่าง ๆ

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และญาติพี่น้อง ที่คอยให้การสนับสนุนในทุก ๆ เรื่อง จนข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์นี้จนลุล่วง

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าหวังว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ให้กับทุกคนที่มีความสนใจหรือต้องการทำการทดลองที่คล้ายคลึงและใกล้เคียงกับวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้า เพื่อค้นพบองค์ความรู้ใหม่และพัฒนาต่อยอดความรู้ต่อไปอย่างไม่มีที่สิ้นสุด

สมพร มะหะหมัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ III งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนด.....	2
1.4 วิธีการทดลองในงานวิจัย.....	2
1.5 แผนการดำเนินงาน.....	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	4
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....</b>	<b>4</b>
2.1 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.3 ลักษณะของเครื่องเชื่อมชนิดลวดแข็งตันและกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม (Gas Metal Arc Welding: GMAW).....	9
2.3.1 การเชื่อมแบบช็อตอาร์ค.....	10
2.3.2 การเชื่อมแบบแบบสเปร์.....	11
2.3.3 การเชื่อมแบบพัลส์.....	12
2.3.4 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	13
2.3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม.....	14
2.3.6 เครื่องเชื่อมชนิดลวดแข็งตัน.....	14
2.4 วงจรแปลงผันทอนระดับ.....	15
2.4.1 ความสัมพันธ์แรงดันและกระแส.....	15
2.4.2 แรงดันรีปเปิลและเอาต์พุต.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ V ึ่งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

2.5 วงจรอินเวอร์เตอร์.....	24
2.5.1 วงจรแปลงผันแบบเต็มบริดจ์.....	24
2.5.2 อินเวอร์เตอร์รูปคลื่นสี่เหลี่ยม.....	26
<b>บทที่ 3 หลักการทำงานและการออกแบบ.....</b>	<b>29</b>
3.1 บทนำ.....	29
3.2 โครงสร้างของวงจรอาร์คสตาร์ทและบล็อกไดอะแกรมการทำงาน.....	29
3.3 อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ในวงจรอาร์คสตาร์ท.....	35
3.4 คอนแทคทูป หรือ อิเล็กโทรด.....	36
3.5 โลหะที่นำมาใช้ในการทดลอง.....	39
<b>บทที่ 4 การจำลองการทำงาน และผลลัพธ์การทดลอง.....</b>	<b>41</b>
4.1 บทนำ.....	41
4.2 การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	41
4.2.1 ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	42
4.2.2 ผลการวัดสัญญาณรูปคลื่นจากเครื่องเชื่อมชนิดลวดแข็งต้น.....	44
4.2.3 ผลการเชื่อมชิ้นงานบนแผ่นเหล็ก.....	47
4.2.4 การตรวจสอบความเข้มลึกของชิ้นงาน.....	50
4.2.5 ผลของอุณหภูมิตรงตำแหน่งอาร์คสตาร์ท.....	53
4.2.6 ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุตรงตำแหน่งวงจรอาร์คสตาร์ท.....	55
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>57</b>
5.1 สรุป.....	57
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	58

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ช่วงกระแสแบบ Short Arc สำหรับลวดเหล็กขนาดต่าง ๆ .....	10
3.1 ค่าความต้านทานของคอนแทกทีปแต่ละขนาด.....	36
3.2 ตารางความต้านทานและการนำไฟฟ้าของตัวนำแต่ละชนิดที่ 20° C.....	37
3.3 ตารางคุณสมบัติทางกลของเหล็กชนิด SPCC.....	39
3.4 ตารางคุณสมบัติความร้อนของเหล็กชนิด SPCC.....	39
4.1 ผลการเชื่อมบนลวดเชื่อมต่างกันแบบมีอาร์คสตาร์ทและไม่มีอาร์คสตาร์ท.....	47
4.2 เป้าหมายเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับความชื้นลึกของการเจาะรอยเชื่อม.....	52
4.3 ผลการทดสอบยืนยันตามเงื่อนไขการเชื่อมที่เหมาะสมที่สุด.....	53
4.4 ผลการทดสอบหาค่าเฉลี่ยความร้อน ณ จุดอาร์คสตาร์ท.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 บล็อกไดอะแกรมของวงจรการจุดระเบิดด้วยอาร์คโดยใช้การคายประจุกระแสตรง	5
2.2 แผนผังการทำงานของทดสอบการอาร์คด้วยลวดเชื่อม	6
2.3 รูปวงจรการจุดระเบิดอาร์คแบบลวดสะเก็ดไฟเชื่อม	7
2.4 วงจรการจุดระเบิดอาร์คสตาร์ทไฟแรงสูงแบบใช้ฟลายแบ็คทรานส์ฟอร์มเมอร์	8
2.5 การถ่ายเทโลหะแบบ Short Circuit	10
2.6 การถ่ายเทโลหะแบบ Spray arc	12
2.7 ไดอะแกรมการถ่ายเทโลหะแบบพัลส์	13
2.8 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมอาร์คโลหะ	14
2.9 ลักษณะเครื่องเชื่อมชนิดลวดแข็งตัน และลวดเชื่อม	15
2.10 วงจรแปลงผันสวิตซ์ไฟฟ้ากระแสตรง-ไฟฟ้ากระแสตรงพื้นฐาน	16
2.11 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง-ไฟฟ้ากระแสตรงแบบทอนระดับแรงดัน	17
2.12 สัญญาณรูปคลื่นของวงจรทอนระดับแรงดัน	19
2.13 รูปคลื่นของวงจรแปลงผันทอนระดับแรงดัน	23
2.14 วงจรแปลงผันแบบเต็มบริดจ์	25
2.15 แรงดันเอาต์พุตรูปคลื่นสี่เหลี่ยมและรูปคลื่นกระแสสภาวะอยู่ตัวที่โหลด RL	27
3.1 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องเชื่อมชนิดลวดแข็งตัน	29
3.2 โครงสร้างวงจรอาร์คสตาร์ท	30
3.3 วงจรอาร์คสตาร์ทต้นแบบที่ใช้ในการทดลอง	31
3.4 โครงสร้างวงจรขับรีเลย์วงจรอาร์คสตาร์ท	32
3.5 รูปวงจรต้นแบบขับรีเลย์วงจรอาร์คสตาร์ท	32
3.6 ลักษณะการต่อวงจรอาร์คสตาร์ทเข้าร่วมกับวงจรอินเวอร์เตอร์	33
3.7 ลักษณะการต่อสัญญาณโวลต์เตจดีเทคจากเครื่องเชื่อมไปขับวงจรรีเลย์	33
3.8 วงจรทอนระดับแรงดัน	34
3.9 อิเล็กทรอนิกส์กำลังในงานวิจัย	39
3.10 คอนแทคทีป หรือ อิเล็กโทรด	37
3.11 เหล็กชนิด SPCC ที่ใช้ในงานวิจัย	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VIII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.1 ลักษณะวงจรรีเลย์ที่ใช้ในการจำลองทำงานร่วมกับวงจรรีเลย์อินเวอร์เตอร์.....	41
4.2 ลักษณะวงจรรีเลย์ที่ใช้ในการจำลอง.....	42
4.3 ผลการจำลองผ่านโปรแกรม เส้นสีแดงคือ V out ส่วนสีเหลืองคือ I arc start ของการอาร์คสตาร์ทแบบไม่มีวงจรรีเลย์.....	43
4.4 ผลการจำลองผ่านโปรแกรม เส้นสีแดงคือ V out ส่วนสีน้ำเงินคือ I arc start ของการอาร์คสตาร์ทแบบมีวงจรรีเลย์.....	43
4.5 ผลการวัดสัญญาณที่จุดเอาต์พุตของเครื่องเชื่อมขณะเริ่มต้นเชื่อมที่ขนาด ลวดเชื่อม 1.2 mm แบบไม่มีวงจรรีเลย์.....	44
4.6 ผลการวัดสัญญาณที่จุดเอาต์พุตของเครื่องเชื่อมขณะเริ่มต้นเชื่อมที่ขนาด ลวดเชื่อม 1.2 mm แบบมีวงจรรีเลย์.....	45
4.7 ผลการวัดสัญญาณกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่จุด A และจุด B ของเครื่องเชื่อมขณะเชื่อมชิ้นงาน.....	46
4.8 ผลการวัดสัญญาณกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ไหลผ่าน IGBT ที่จุด Q1 ของเครื่องเชื่อมขณะเชื่อมชิ้นงาน.....	46
4.9 ผลการวัดสัญญาณแรงดันรูปคลื่นไฟฟ้าทกคล่อม IGBT ที่จุด Q1 และ Q2 เปรียบเทียบกับขณะไม่มีโหลด.....	47
4.10 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมชิ้นงานในการวิจัย.....	48
4.11 การทดสอบการเชื่อมชิ้นงานจะใช้โรบอทในการเชื่อม.....	49
4.12 ผลการเชื่อมบนชิ้นงานแบบไม่มีวงจรรีเลย์และแบบมีวงจรรีเลย์.....	50
4.13 ผลการตรวจสอบความขี้มลึก.....	51
4.14 ผลการตรวจสอบความขี้มลึกชิ้นงาน.....	51
4.15 ผลของการวัดอุณหภูมิโดยใช้ปืนยิงความร้อนแบบอินฟาเรด.....	54
4.16 ผลของการตัดเช็คตรวจสอบความขี้มลึกของชิ้นงานเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุ.....	55
4.17 กราฟแสดงค่าความขี้มลึกของชิ้นงานที่จุดอาร์คสตาร์ทเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุ.....	56
4.18 กราฟแสดงกระแสอาร์คสตาร์ทแต่ละขนาดของลวดเชื่อม.....	56
4.19 กราฟแสดงดิฟเฟอเรนเชียลการทำงานของเครื่องเชื่อมที่นำมาศึกษาวิจัย.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ IX อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

จากสภาวะการขยายตัวในวงการอุตสาหกรรมไทย ในปัจจุบันจะพบว่า ประเทศของเรามีการขยายตัวในด้านอุตสาหกรรมอย่างมาก วิธีการผลิตหรือจัดทำใน อุตสาหกรรม ซึ่งมีอยู่เน้นเกี่ยวข้องกับวัสดุจำพวกโลหะเป็นส่วนมาก ซึ่งอาจจะเป็นการใช้ในการทำเครื่องมือเครื่องจักรต่าง ๆ หรือในการก่อสร้างก็อาจจะมีโครงสร้างที่เป็นโลหะ แต่อุตสาหกรรมการเชื่อมโลหะที่สำคัญในประเทศไทยก็คือ อุตสาหกรรมยานยนต์ เพราะฐานการผลิตรถยนต์ในประเทศไทยนั้นมีมาก ซึ่งงานเชื่อมโลหะในอุตสาหกรรมยานยนต์นั้น แนวเชื่อมจะต้องมีการเชื่อมที่มีสะเก็ดไฟในการเชื่อมติดชิ้นงานให้น้อยที่สุดได้มาตรฐานและมีความปลอดภัยกับผู้ใช้งานยนต์ แต่เมื่อมีการเปลี่ยนรุ่นของรถยนต์ใหม่ทางผู้ประกอบการก็จะมีการทดสอบชิ้นงานตัวใหม่(Trial) ซึ่งปัญหาสำคัญของการทดสอบแนวเชื่อมของชิ้นงานต้นแบบตัวแรกก็คือแนวเชื่อมและสะเก็ดไฟเชื่อมติดอยู่บนชิ้นงานมากไม่ได้มาตรฐาน โดยเฉพาะจุดเริ่มต้นของแนวเชื่อม เพราะว่าเหล็กก่อนที่จะทำการเชื่อมนั้นจะอยู่ในอุณหภูมิที่เย็นตัว แนวเชื่อมบริเวณนี้ก็จะเชื่อมที่น้อยกว่าแนวหลังจากการเชื่อมไปได้สักระยะ ทำให้สิ้นเปลืองชิ้นงานในการทดสอบมากมาย สิ้นเปลืองงบประมาณ และเสียเวลาในการทดสอบชิ้นงานมาก ปัจจัยดังกล่าวจึงทำให้เกิดมีการศึกษาค้นคว้าและวิเคราะห์เกี่ยวกับงานเชื่อมโลหะ เราจะมีวิธีการอย่างไรที่จะช่วยให้จุดเริ่มต้นของการเชื่อมนั้นมีการเชื่อมที่ดี ได้มาตรฐาน ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงเล็งเห็นว่าจะมีวงจรอะไรที่จะมาช่วยในการสตาร์ทการเชื่อมให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นลดการสิ้นเปลืองชิ้นงานที่นำมาทดสอบลดค่าใช้จ่าย และลดเวลาในการทดสอบชิ้นงานต้นแบบ

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

จากปัญหาที่ได้กล่าวมาจึงเป็นที่น่าสนใจในการพัฒนาและศึกษาวิธีการเชื่อมที่เป็นจุดเริ่มต้นของการเชื่อม ซึ่งมีวัตถุประสงค์หลัก ดังนี้

1. เพื่อศึกษาการทำงานของวงจรอาร์คสตาร์ทสำหรับเครื่องเชื่อมชนิดลวดแข็งต้น
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติของวงจรที่จะนำมาใช้ในวงจรอาร์คสตาร์ท
3. เพื่อศึกษาวิเคราะห์การทำงานของเครื่องเชื่อมชนิดลวดแข็งต้น
4. เพื่อส่งเสริมให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านงานเชื่อม
5. สามารถนำวงจรดังกล่าวไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัยอื่น ๆ ที่มีแนวทางเดียวกันได้

### 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนด

1. ศึกษาการทำงานของเครื่องเชื่อมชนิดลวดแข็งต้นและออกแบบวงจรรีเลย์สำหรับเครื่องเชื่อมชนิดลวดแข็งต้น
2. ลวดเชื่อมที่ใช้ในการทดลองเป็นชนิดลวดแข็งต้นขนาด 1.2 mm ใช้เหล็กขนาด 3.2 mm และแก๊สที่ใช้ในการเชื่อมเป็นชนิด  $Co_2$
3. เปรียบเทียบรอยเชื่อมตรงจุดเริ่มต้นเชื่อมแบบทั้งที่มีวงจรรีเลย์และไม่มีวงจรรีเลย์ โดยการศึกษาความถี่ของคลื่นความถี่ของแนวเชื่อม โดยที่การเชื่อมแบบมีวงจรรีเลย์จุดเริ่มต้นเชื่อมความถี่จะต้องมากกว่าแบบไม่มีวงจรรีเลย์
4. ทดลองการจำลองการทำงานของวงจรรีเลย์ที่ออกแบบ โดยใช้ทั้งโปรแกรมการจำลอง และอุปกรณ์จริง
5. ขอบเขตแรงดันและกระแสไฟฟ้าของเครื่องเชื่อมชนิดลวดแข็งต้นที่นำมาทดลองคือ อินพุต 3 เฟส 380 V, 18kVA 16kW กระแสเชื่อมสูงสุดของเครื่องเชื่อมอยู่ที่ 350 A และแรงดันเอาต์พุตขณะไม่มีโหลดอยู่ที่ 65 VDC

### 1.4 วิธีการทดลองในงานวิจัย

ทำการจำลองการทำงานของวงจรรีเลย์ผ่านโปรแกรม P-SIM เพื่อทดสอบเงื่อนไขการทำงานและเป็นการตรวจสอบจุดการวัดสัญญาณของวงจรรีเลย์และแนวโน้มความเป็นไปได้ของรูปสัญญาณที่จะนำไปเปรียบเทียบบนอุปกรณ์จริง หลังจากการทดลองส่วนนี้ผ่านไปถ้าผลลัพธ์ของรูปคลื่นสัญญาณมีแนวโน้มที่สามารถจะวัดรูปคลื่นสัญญาณออกมาได้จึงเริ่มดำเนินการในส่วนของการอุปกรณ์จริงต่อไป

ในส่วนของการอุปกรณ์จริงได้ใช้เครื่องเชื่อมชนิดลวดแข็งต้นพร้อมทั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมครบชุดทั้งหมดตามความเหมาะสมและชิ้นงานที่เป็นโลหะในการทดสอบมีการเชื่อมจริงและมีการเก็บบันทึกสัญญาณไปใช้ในการวิเคราะห์ โดยหลัก ๆ เรามุ่งเน้นศึกษาไปที่วงจรรีเลย์ โดยอุปกรณ์ของวงจรรีเลย์ประกอบไปด้วย SCR 2 ตัวที่ต่อขนานกันและตัวเก็บประจุที่ใช้เป็นตัวถ่วงกระแสลงบนชิ้นงานที่เป็นเหล็กขณะเริ่มต้นการเชื่อมต่อผ่านวงจรรีเลย์หลัก (วงจรรีเลย์อินเวอร์เตอร์) ของเครื่องเชื่อมชนิดลวดแข็งต้น

### 1.5 แผนการดำเนินงาน

ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับงานเชื่อมโลหะเทคนิควิธีการเชื่อมโลหะแบบต่าง ๆ นำมาเปรียบเทียบกัน ติดตามหาจุดการทำงานของเครื่องเชื่อม ข้อควรระวังในการวัดสัญญาณบนวงจรรีเลย์ เพื่อไม่ให้เกิดอันตรายแก่ผู้ทดลองทำการวิจัย ศึกษาการ Cut-Check ชิ้นงานที่เป็นโลหะ ศึกษาวงจรรีเลย์ที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยและศึกษาโปรแกรมจำลองคอมพิวเตอร์ที่จะนำมาใช้ในการซิมูเลชันวงจร โดยมีวิธีการดำเนินการทดลอง ดังนี้

1. ศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องในอดีต
2. ศึกษาการทำงานของเครื่องเชื่อมแบบอินเวอร์เตอร์ชนิดลวดแข็งต้น
3. ออกแบบวงจรรีเลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. คำนวณหาค่าอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจร
5. จำลองการทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์
6. นำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับความถูกต้อง
7. ทำการทดลองโดยการเชื่อมชิ้นงานและเก็บบันทึกรูปสัญญาณ ณ จุดสำคัญต่าง ๆ ของวงจร ทั้งวงจรอาร์คสตาร์ท และวงจรอินเวอร์เตอร์
8. ทำการตรวจสอบชิ้นงานที่ได้จากการทดลอง โดยการตัดเช็คชิ้นงานและเปรียบเทียบกันระหว่างมีวงจรอาร์คสตาร์ท กับไม่มีวงจรอาร์คสตาร์ท
9. สรุปผลและเสนอแนะ
10. จัดทำวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็น 5 ส่วนด้วยกันได้แก่

บทที่ 1 กล่าวถึงที่มาและความสำคัญ จุดมุ่งหมาย สมมุติฐาน ขอบเขตการวิจัย ขั้นตอนในการศึกษาและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ได้แก่ ตัวอย่างงานวิจัยที่ใกล้เคียง ทฤษฎีของการเชื่อมโลหะและอุปกรณ์การเชื่อมโลหะ ทฤษฎีของวงจรที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยไม่ว่าจะเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ และ วงจรทอนระดับแรงดัน

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบวงจรอาร์คสตาร์ท การทำงานของวงจรอาร์คสตาร์ท อุปกรณ์ที่ใช้ในวงจร และการคำนวณหาค่าอุปกรณ์ต่างๆในวงจร

บทที่ 4 กล่าวถึงการซิมูเลชันวงจรผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ การทดสอบในวงจรจริงๆ และการวัดสัญญาณขณะทดสอบการเชื่อมชิ้นงาน และมีการทดสอบการซิมูเลชันของชิ้นงานทั้งแบบมีวงจรอาร์คสตาร์ทและไม่มีวงจรอาร์คสตาร์ท

บทที่ 5 กล่าวถึงสรุปผลและข้อเสนอแนะ

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. วิทยานิพนธ์วิจัยฉบับนี้ทำให้เกิดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับเครื่องเชื่อมที่เป็นชนิดลวดแข็งต้นที่สามารถนำจุดบกพร่องของเครื่องหรือจุดเด่นของเครื่องมาทำการวิเคราะห์วิจัยและพัฒนา เพื่อสามารถทำให้มีการจัดการพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพและก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด
2. สามารถนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในเรื่องอื่น ๆ ที่นอกเหนือไปจากโครงการวิจัยนี้ได้ เช่น วงจรควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า วงจรควบคุมเฟสไฟฟ้า เป็นต้น
3. วิทยานิพนธ์เล่มนี้ สามารถเป็นข้อมูลพื้นฐานให้แก่ผู้ที่สนใจในเรื่องเครื่องเชื่อมชนิดที่เป็นลวดแข็งต้น ซึ่งสามารถนำข้อมูลไปเป็นพื้นฐานสำหรับการพัฒนาต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

### 2.1 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี พ.ศ. 2534 มีการนำเสนอเรื่อง “Arc ignition using DC discharges” [1] โดย M. SAIEPOUR และ J. E. HARRY ซึ่งมีเนื้อหาเกี่ยวกับการสร้างวงจรการจุดระเบิดด้วยอาร์คโดยใช้การคายประจุกระแสตรง โดยการสร้างแหล่งพลังงานสูงๆจากแหล่งกำเนิดไฟกระแสตรงภายนอกมาทำงานร่วมกับแรงดันเอาต์พุตขณะเริ่มต้นเชื่อมชิ้นงาน แต่วงจรที่นำเสนอนี้เป็นการใช้งานในเครื่องเชื่อมแบบทังสเตน (TIG Welding) โดยตัวอย่างการออกแบบแสดงให้เห็นว่าโดยทั่วไปแหล่งจ่ายการเชื่อมของเอาต์พุตที่ 80 V ขณะไม่มีโหลด แหล่งกำเนิดประกายไฟต้องมีแรงดันเอาต์พุตอย่างน้อย 4kV และกระแสไฟขาออกอย่างน้อย 0.5 A เป็นเวลาอย่างน้อย 56 us และชิ้นงานเหล็กในการเชื่อมอาร์ค (TIG) ควรมีขนาดความหนาที่ขนาด 3 มม.

ในปี พ.ศ. 2560 มีการนำเสนอผลงานวิจัย “Arc Ignition of CWW CO2 Welding in A36 Steel” [2] โดย Zhidong Yang, Chenfu Fang, Yong Chen, Zhiwei Chen และ Yu Zhu ซึ่งมีเนื้อหาเกี่ยวกับการวิจัยการจุดไฟอาร์คของการเชื่อม CWW CO2 ในเหล็กชนิด A36 โดยเนื้อหาหลักเป็นการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดเชื่อมกับระยะทางที่ลวดลงไปกระทบกับผิวเหล็ก ในการทดลองจะใช้ลวดเชื่อม หลายขนาดในการทดลองบนเหล็กชนิด A36 และนำค่าที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบว่าลวดเชื่อมแต่ละขนาดควรจะมีระยะห่างระหว่างลวดเชื่อมกับชิ้นงานที่ระยะเท่าไรถึงจะดีที่สุด

ในปี พ.ศ. 2561 มีการนำเสนอผลงานวิจัย “An Advanced Gas Metal Arc Welding Machine Design for Low Spatter Welding” [3] โดย Dr. Mingfei Wu and Dr. David Flynn ซึ่งมีเนื้อหาการวิจัยของการอาร์คสตัดท์โดยการลดสะเก็ดไฟเชื่อม โดยใช้หลักการของการปิดไขเค็ลการทำงานของแต่ละรูปคลื่นให้เร็วที่สุด โดยใช้อิเล็กทรอนิกส์กำลังเข้าไปต่ออนุกรมกับเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ของเครื่องเชื่อมชนิดลวดแข็งต้นแล้วควบคุมการเปิด-ปิดวงจรด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งจะช่วยในการปิดไขเค็ลการทำงานให้เร็วที่สุด

ในปี พ.ศ. 2564 มีการนำเสนอผลงานวิจัย “Electronic Arc Ignition System for the Electric Arc Plasmatron” [4] โดย Vladimir Pikalov, Andrei Boikov และ Vladislav Znamensky ซึ่งมีเนื้อหาเกี่ยวกับการวิจัยการจุดไฟอาร์คของการเชื่อมตัดแบบพลาสมา โดยเนื้อหาหลักเป็นการออกแบบการอาร์คสตัดท์โดยใช้อิเลคโตรดไม่แตะลงไปบนชิ้นงาน โดยใช้แรงดันไฟสูงจากหม้อแปลง (Flyback Transformer) ในการอาร์คสตัดท์โดยที่แรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ได้จากหม้อแปลงจะมีค่าประมาณ 50-60 kV โดยการทำงานจะเริ่มจากนำอิเลคโตรดไปใกล้ๆชิ้นงานในระยะที่แรงดันไฟสูงสามารถกระโดดข้ามอากาศไปแตะลงบนชิ้นงานและสามารถอาร์คสตัดท์ได้

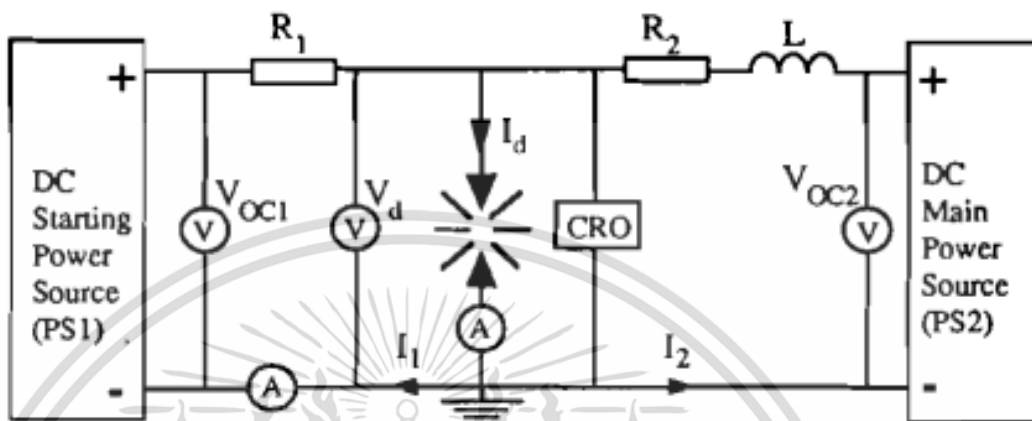
โดยวรรณกรรมที่นำเสนอมาข้างต้นนั้นจะนำไปศึกษาและพัฒนาออกแบบวงจรอาร์คสตัดท์ในเครื่องเชื่อมชนิดลวดแข็งต้นให้มีประสิทธิภาพในขณะเริ่มต้นเชื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

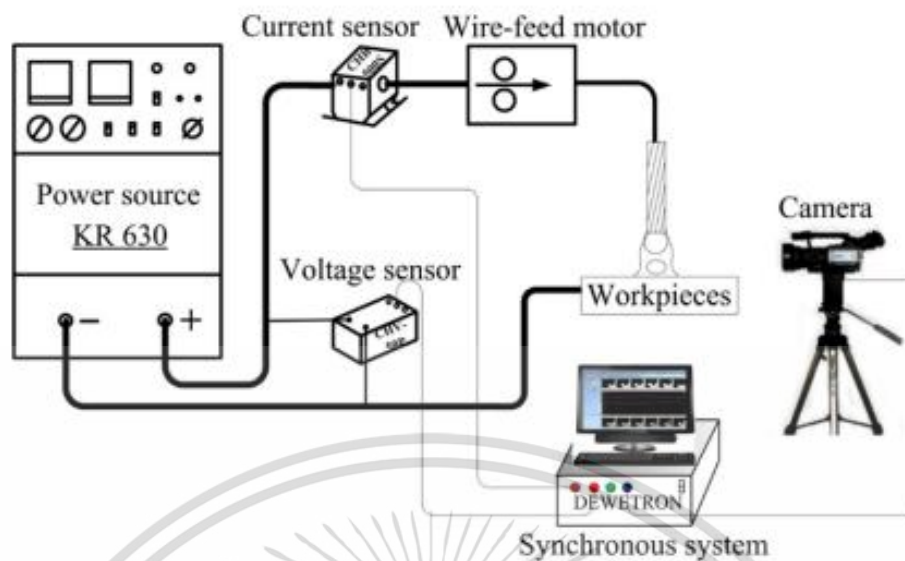
## 2.2 งานวิจัยที่ใกล้เคียง

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงบทความที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยเพื่อนำมาเป็นข้ออ้างอิงเปรียบเทียบความเหมือนความแตกต่างของงานวิจัย โดยจะมีการนำเสนอรูปภาพลือการทำงานและวงจรการทำงาน ของงานวิจัยที่ใกล้เคียงที่ผ่านมาในอดีต



รูปที่ 2.1 บล็อกไดอะแกรมของ วงจรการจุดระเบิดด้วยอาร์คโดยใช้การคายประจุกระแสตรง [1]

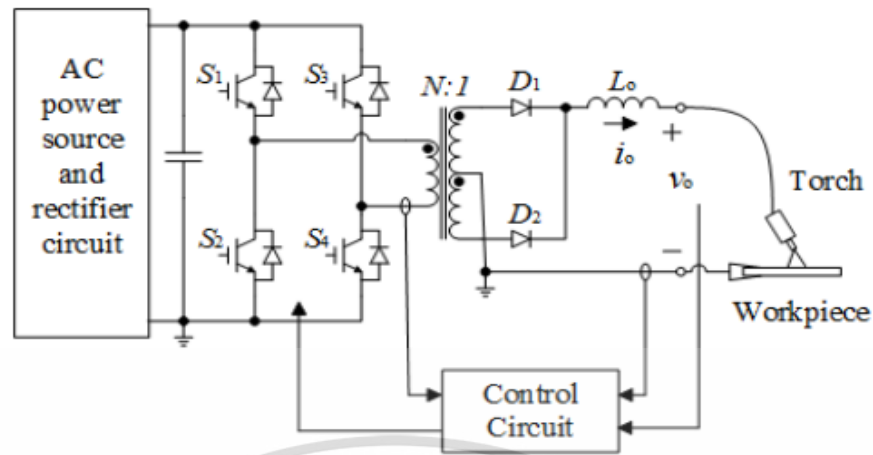
จากรูปที่ 2.1 เป็นบล็อกไดอะแกรมของ วงจรการจุดระเบิดด้วยอาร์คโดยใช้การคายประจุแบบกระแสตรง [1] โดยรูปแบบการทำงานของวงจรคือ จะมีแรงดันไฟกระแสตรง (DC Starting Power Source) PS1 เป็นแรงดันไฟกระตุ้นการอาร์คสตาร์ทของวงจร ขณะเริ่มต้นโดยมีแรงดันไฟประมาณ 1-2kV ในระยะเวลา 100-300 us โดยที่การเชื่อมนั้นจะนำอิเล็กโทรดเข้าไปใกล้ชิ้นงานในระยะหนึ่ง จากนั้นแรงดันอาร์คสตาร์ทจะกระโดดข้ามอากาศเข้าไปกระทบกับชิ้นงานเหล็กจนเกิดการเชื่อมได้ จากนั้นเมื่ออาร์คสตาร์ทได้แล้วแรงดันเอาท์พุท (DC Main power source) PS2 จะเข้ามาแทนที่แรงดันอาร์คสตาร์ท โดยมีแรงดันเอาท์พุทอยู่ที่ 0-80 VDC แต่ที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นเป็นเชื่อมแบบ Tungsten Inert Gas (TIG) โดยมีแท่งทังสแตนเป็นอิเล็กโทรดและใช้แก๊สอาร์กอนในการเชื่อมชิ้นงาน



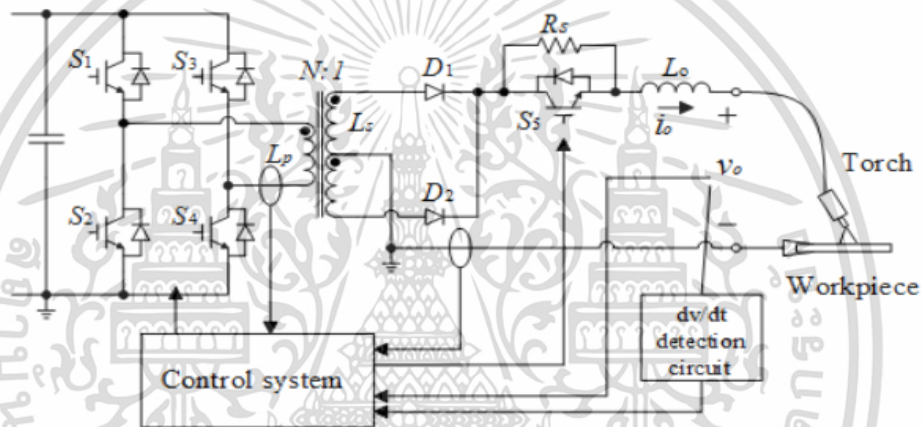
รูปที่ 2.2 แผนผังการทำงานของ การทดสอบการอาร์คด้วยลวดเชื่อมหน้าตัดแบบเรียบและไม่เรียบ[2]

จากรูปที่ 2.2 เป็นแผนผังการทำงานของ การทดสอบการอาร์คด้วยลวดเชื่อมชนิดแข็ง ตันหน้าตัดแบบเรียบและไม่เรียบ [2] โดยลักษณะของการวิจัยคือการหาค่าความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ นำมาทดสอบโดยจะทดสอบการอาร์คด้วยลวดเชื่อมขนาดต่างๆ ในลักษณะหน้าตัดของลวด เชื่อมแบบไม่เรียบและเรียบในลักษณะหน้าตัดลวดจะกระทบกับชิ้นงานเปรียบเทียบกันว่าแบบไหนจะ ให้การอาร์คที่ดีกว่ากันโดยมีค่าตัวแปรหลายตัวแปรในการทดสอบการเชื่อมไม่ว่าจะเป็นกระแส ของการเชื่อมและแรงดันในการเชื่อม ระยะห่างระหว่างลวดเชื่อมกับชิ้นงานในระยะต่างๆความเร็วใน การเชื่อมชิ้นงาน มุมของลวดเชื่อมที่ตั้งฉากกับชิ้นงานว่ามีมุมเท่าใด ชนิดของแก๊สเชื่อม และอัตราการ ไหลของแก๊สเชื่อม โดยมีกล้องความเร็วสูงบันทึกภาพขณะลวดเชื่อมลงตะที่ชิ้นงานว่ามี การระเบิด ของสะเก็ดไฟมากน้อยเพียงใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



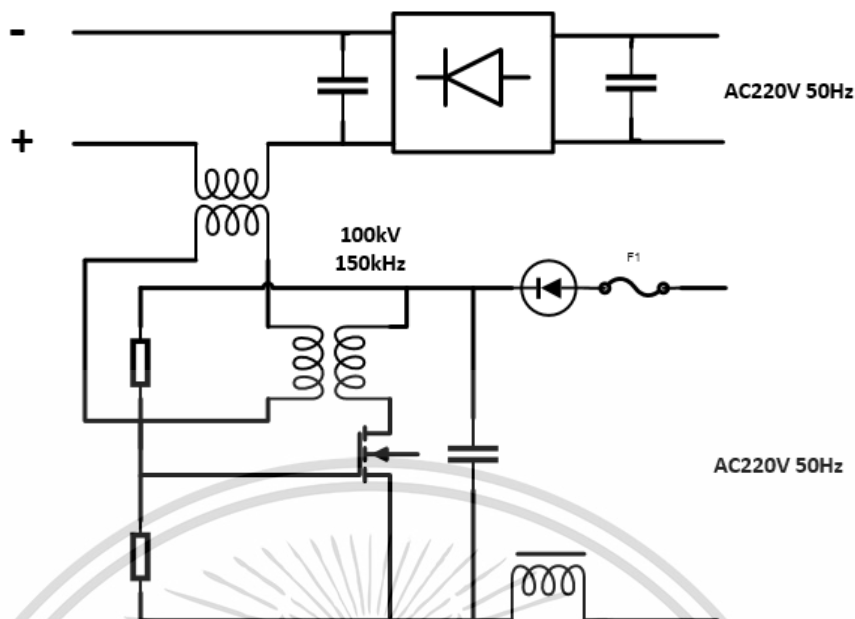
(ก)



(ข)

รูปที่ 2.3 รูปวงจรการจุดระเบิดอาร์คแบบลัดสะกัดไฟเชื่อม (ก) แบบเดิม (ข) แบบใหม่ [3]

จากรูปที่ 2.3 เป็นวงจรการจุดระเบิดด้วยอาร์คแบบลัดสะกัดไฟเชื่อม [3] ซึ่งมีเนื้อหาการวิจัยของการอาร์คสตาร์ทโดยการลัดสะกัดไฟเชื่อมนี้ โดยใช้หลักการของการปิดไซเคิลการทำงานของแต่ละรูปคลื่นให้เร็วที่สุด โดยใช้ไออิเล็กทรอนิกส์กำลังเข้าไปต่ออนุกรมกับเอาต์พุทของวงจรรีเลย์เตอร์ของเครื่องเชื่อมชนิดลวดแข็งต้นแล้วควบคุมการเปิด-ปิดวงจรด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งจะช่วยในการปิดไซเคิลการทำงานให้เร็วที่สุด โดยรูป (ก) จะเป็นวงจรแบบเดิม ส่วนรูป (ข) เป็นวงจรที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ เพราะการที่สวิตช์ เปิด-ปิด การทำงานของไซเคิลการทำงานซ้ำ จะมีแรงดันระหว่างไซเคิลไปหลอมละลายโลหะและทำให้เกิดสะกัดไฟมากขึ้น



รูปที่ 2.4 รูปวงจรการจุดระเบิดอาร์คสตาร์ทไฟแรงสูงแบบใช้ฟลายแบ็คทรานฟอเมอร์ [4]

จากรูปที่ 2.4 คือรูปวงจรอาร์คสตาร์ทไฟแรงสูงโดยใช้ฟลายแบ็คทรานฟอเมอร์ [4] เป็นการจุดไฟอาร์คสตาร์ทของการเชื่อมตัดแบบพลาสมา อินพุทโวลต์เตจใช้ไฟ 220 VAC จากนั้นจะมีอิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นตัวสวิตซ์การทำงานของวงจรโดยมีฟลายแบ็คทรานฟอเมอร์เป็นตัวสร้างแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้น การเชื่อมนั้นจะไม่ให้อิเลคโตรดแตะลงไปในชิ้นงาน แต่จะใช้แรงดันไฟสูงจากหม้อแปลงฟลายแบ็ค (Flyback Transformer) ในการอาร์คสตาร์ทโดยที่แรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ได้จากหม้อแปลงจะมีค่าประมาณ 50-60 kV โดยการทำงานจะเริ่มจากนำอิเลคโตรดไปใกล้ๆ ชิ้นงานในระยะที่แรงดันไฟสูงสามารถกระโดดข้ามอากาศไปแตะลงบนชิ้นงานและสามารถอาร์คสตาร์ทได้

จากงานวิจัยที่ได้ยกตัวอย่างมาข้างต้นทั้งสี่แบบนี้คืองานวิจัยที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยในเล่มนี้มากที่สุด แต่งานวิจัยในเล่มนี้นั้นต้องการการอาร์คสตาร์ท ณ จุดเริ่มต้นเชื่อมโดยใช้ลวดเชื่อมชนิดแข็งต้นและมีแก๊ส  $CO_2$  ในกระบวนการเชื่อมและต้องการความซึมลึก ณ จุดเริ่มต้นเชื่อม เมื่อลองเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่รูป 2.1 จะเห็นว่าเป็นการเชื่อมแบบใช้ทั้งสแตนเป็นอิเลคโตรด และใช้แก๊สอาร์กอนในการเชื่อม มีการใช้แรงดันไฟประมาณ 1-2 kV จากแหล่งจ่ายภายนอกในการกระตุ้นการอาร์คสตาร์ท แต่สำหรับงานวิจัยในเล่มนี้ใช้การอาร์คสตาร์ทจากวงจรที่ออกแบบและใช้แรงดันจากเอาต์พุทของวงจรเครื่องเชื่อมชนิดอินเวอร์เตอร์มาจ่ายให้กับวงจรอาร์คสตาร์ทในการทำงาน หรือแม้กระทั่งตัวอย่างงานวิจัยในรูปที่ 2.4 เป็นตัวอย่างงานวิจัยของการอาร์คสตาร์ทในเครื่องเชื่อมแบบใช้ทั้งสแตนเป็นอิเลคโตรดในการเชื่อมและใช้แก๊สอาร์กอนในการเชื่อม งานวิจัยนี้ใช้การอาร์คสตาร์ทโดยใช้แรงดันไฟกระแสสลับที่ได้จากหม้อแปลงฟรายแบ็ค เป็นตัวกระตุ้นในการอาร์คสตาร์ท จะเห็นว่าทั้งสองแบบนี้ต้องการแค่การกระตุ้นการทำงานของวงจรเท่านั้นและไม่ได้ต้องการความซึมลึกของแนวเชื่อม ซึ่งต่างจากงานวิจัยในเล่มนี้ที่ต้องการความซึมลึกของแนวเชื่อมด้วย

หรือหากเปรียบเทียบกับงานวิจัยจากตัวอย่างในรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นการวิจัยตัวแปรในการเชื่อมชิ้นงาน โดยงานวิจัยนี้ได้หากระแสการเชื่อม แรงดันที่ใช้ในการเชื่อม ความเร็วในการเชื่อม และมุมมองของปืนเชื่อมว่าแบบไหนให้ความซึมลึกและมีสะเก็ดไฟในการเชื่อมน้อยที่สุด ซึ่งงานวิจัยตัวนี้ไม่มีวงจรในการทำงาน ซึ่งหากเปรียบเทียบกับงานวิจัยในเล่มนี้ซึ่งมีวงจรในการทำงาน

หรือหากจะเปรียบเทียบกับงานวิจัยในรูปที่ 2.4 เป็นงานวิจัยที่ต้องการลดสะเก็ดไฟในการเชื่อมให้น้อยลง โดยใช้หลักการสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเข้าไปต่ออนุกรมทางฝั่งวงจรเอาต์พุตของเครื่องเชื่อมอินเวอร์เตอร์ แล้วควบคุมการเปิด-ปิดวงจรด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งจะช่วยในการปิด-เปิดการทำงานให้เร็วที่สุด โดยรูป (ก) จะเป็นวงจรแบบเดิม ส่วนรูป (ข) เป็นวงจรที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ โดยที่งานวิจัยนี้หากเปรียบเทียบกับงานวิจัยในเล่มจะเห็นว่ามีการใช้หลักการซอฟต์แวร์สตาร์ทเหมือนกัน เพียงแต่งานวิจัยในเล่มนี้ต้องการ การอาร์คสตาร์ทที่จุดเริ่มต้นเพียงช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้นแต่ในงานวิจัยในรูปที่ 2.3 จะมีการคอนโทรลเปิด-ปิด สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังตลอดเวลาของการเชื่อม ซึ่งข้อดีของงานวิจัยในรูปที่ 2.3 คือมีการลดจำนวนของสะเก็ดไฟในการเชื่อมแต่ไม่ได้ไปถึงความซึมลึกของการอาร์คสตาร์ทในขณะเริ่มต้นเชื่อม ซึ่งต่างจากงานวิจัยในเล่มนี้ที่วิจัยถึงวงจรที่จะทำให้การอาร์คสตาร์ทที่มีความซึมลึกที่ดี

## 2.3 ลักษณะของเครื่องเชื่อมชนิดลวดแข็งต้นและกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม (Gas Metal Arc Welding: GMAW)

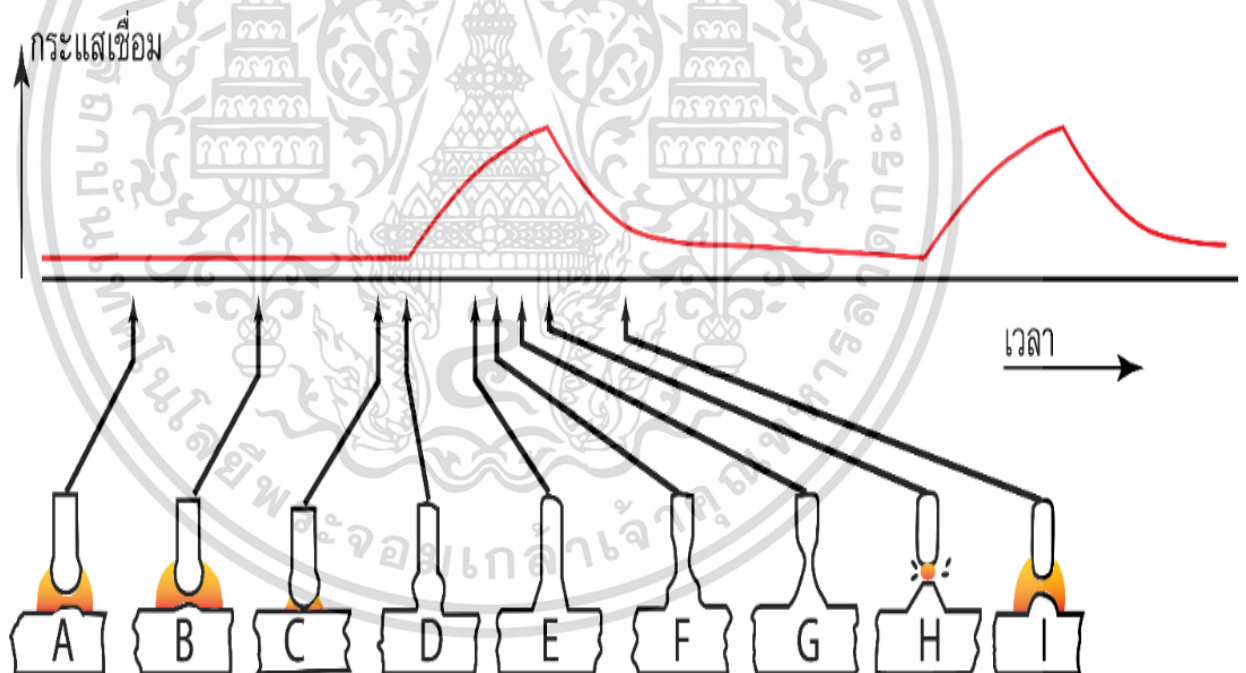
กระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม [5-6] เมื่อลวดเชื่อมจากม้วนลวดจะถูกป้อนด้วยลูกกลิ้งของกลไกป้อนลวด ผ่านท่อนำลวดและท่อนำกระแสออกมาพันปากหัวฉีดยเมื่อปลายลวดเชื่อมแตะกับผิวชิ้นงานจะเกิดการอาร์คขึ้น ความร้อนจากการอาร์คจะหลอมผิวหน้าชิ้นงานและปลายลวดเชื่อมเป็นหยดโลหะ ถ้าย้อนผ่านการอาร์คเข้าสู่บ่อหลอมเหลวเพื่อเติมประสานรอยเชื่อมขณะเดียวกัน แก๊สคลุมจะไหลผ่านหัวฉีดย (nozzle) พุ่งออกมาปกคลุมรอบบริเวณการอาร์ค เพื่อป้องกันความเสียหายของรอยเชื่อมจากบรรยากาศรอบนอกที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับโลหะเชื่อมที่กำลังหลอมเหลว การอาร์คจะเกิดขึ้นต่อเนื่องตลอดเวลาการเชื่อมเพราะใช้ลวดเชื่อมแบบเส้นเปลือยและการป้อนลวดเชื่อมเป็นไปอย่างอัตโนมัติ ส่วนการเคลื่อนที่หัวเชื่อมใช้มือหรือกลไกแล้วแต่จะเป็นวิธีการเชื่อมกึ่งอัตโนมัติหรืออัตโนมัติการเชื่อม GMAW เป็นขบวนการเชื่อมที่นำมาทดแทนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่สามารถเชื่อมโลหะต่าง ๆ ได้หลายชนิดโดยเฉพาะอะลูมิเนียมหนา Metal Inert Gas (MIG) หรือ Gas Metal Arc Welding (GMAW)

การเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม (GMAW) เป็นขบวนการเชื่อมแบบเส้นเปลือยลวดเชื่อม โดยลวดเชื่อมหลอมละลายเติมลงไปแนวเชื่อม ซึ่งตัวป้อนลวดจะดึงลวดออกจากม้วนผ่านไปตามที่อยู่ภายในสายหัวเชื่อมและจะไปถึงจุดสุดท้ายที่ปลายตัวเชื่อม การที่ปลายลวดเชื่อมหลอมและเติมลงไปยังบ่อหลอมละลายนั้นเรียกว่า “ถ่ายเทโลหะ” (Metal Transfer) ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายแบบเช่น short arc, globular transfer, และ pulse เป็นต้น ความแตกต่างของการถ่ายเทโลหะแต่ละชนิดนั้นขึ้นอยู่กับกระแสไฟ แรงเคลื่อนในการอาร์ค ขนาดลวดและชนิดของแก๊สปกคลุม

### 2.3.1 การเชื่อมแบบช็อตอาร์ค (Short Arc Welding)

Short arc ใช้สำหรับการเชื่อมด้วยลวดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.6 มม. ถึง 1.2 มม. บางครั้งเรียกว่า Dip transfer, Micro-wire โดยใช้แรงเคลื่อนและกระแสเชื่อมต่ำ แนวเชื่อมที่ได้จากการถ่ายเทโลหะแบบ short arc จะเย็นตัวเร็ว แนวเชื่อมเล็ก และความเร็วในการถ่ายเทประมาณ 20-200 ครั้งต่อวินาที การถ่ายเทโลหะจะเกิดขึ้นในช่วงที่ลวดเชื่อมสัมผัสกับบ่อหลอมละลาย ข้อดีของการถ่ายเทโลหะแบบ short arc มีดังนี้

1. สามารถเชื่อมโลหะบาง ๆ ได้ทุกท่าเชื่อม
2. สามารถเชื่อมโลหะที่หนาได้ในทางตั้งขึ้นและทำเหนือศีรษะ
3. สามารถเชื่อมงานที่มีระยะห่างรอยต่อมาก ๆ ได้
4. งานเชื่อมเสียรูปน้อย
5. สะเก็ดไฟในการเชื่อมขึ้นงานน้อย
6. สามารถเชื่อมโลหะได้หลากหลายชนิด



รูปที่ 2.5 การถ่ายเทโลหะแบบ Short Circuit [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ช่วงกระแสแบบ Short Arc สำหรับลวดเหล็กขนาดต่าง ๆ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง		ช่วงกระแสเชื่อม	
นิ้ว	มิลลิเมตร	ต่ำ	สูง
0.030	0.76	50	150
0.035	0.89	75	175
0.045	1.1	100	225

จากรูป 2.5 เป็นการถ่ายเทโลหะใน 1 Cycle โดยเริ่มจากจุด A ลวดจากขดลวดจะถูกป้อนสัมผัสกับชิ้นงาน และทำให้กระแสเพิ่มขึ้นจนถึงระดับ Short Circuit เมื่อกระแสขึ้นสูงสุดก็จะเกิดการถ่ายเทโลหะและจะมีช่องว่างระหว่างลวดเชื่อมกับชิ้นงานพร้อมกับการอาร์คก็เกิดขึ้นอีกและตัวป้อนลวดจะป้อนลวดออกมาเร็วทำให้ปลายลวดเชื่อมหลอมละลายไม่ทันจึงสัมผัสกับชิ้นงานและเปลวอาร์คดับลงซึ่งเป็นการเริ่มวงจรใหม่ ที่ A มีข้อสังเกตว่าในขณะที่อาร์คจะไม่มีถ่ายเทโลหะเกิดขึ้นการถ่ายเทโลหะแบบนี้จะทำให้การอาร์คสม่ำเสมอและมีเม็ดโลหะกระเด็นน้อย เครื่องเชื่อมที่ใช้กับการถ่ายเทโลหะแบบนี้จะต้องมีการออกแบบไว้โดยเฉพาะ

### 2.3.2 การเชื่อมแบบสเปรย์ (Spray Arc Welding)

การถ่ายเทโลหะแบบ Spray Arc ซึ่งโลหะจากลวดเชื่อมจะกลายเป็นเม็ดเล็กถ่ายเทจากปลายลวดเชื่อมสู่ชิ้นงานด้วยแรง Electromagnetic Force ซึ่งจะมีเสียงดังแช่ ๆ การที่ลวดเชื่อมหลอมละลาย เป็นเม็ดเล็ก ๆ นั้นเนื่องมาจากการถ่ายเทโลหะนี้ใช้กระแสเชื่อมและแรงเคลื่อนสูงกว่าแบบอื่นทั้งหมดปลายลวดเชื่อมกับชิ้นงานจะไม่มีโอกาสสัมผัสกันเลย เพราะความร้อนที่ได้รับสูงพอที่จะหลอมละลายลวดเชื่อมได้ทันทีการถ่ายเทโลหะแบบนี้จึงเรียบและเหมาะสมสำหรับเชื่อมงานที่มีอัตราการผลิตสูง ๆ ขนาดของเม็ดโลหะที่ถ่ายเทจะมีขนาดความโตใกล้เคียงกับเส้นผ่านศูนย์กลางของ ลวดเชื่อมแนวเชื่อมที่ได้จึงสวยแต่การถ่ายเทโลหะแบบนี้มีข้อจำกัดคือเชื่อมได้ดีเฉพาะท่าราบเท่านั้นแต่ถ้าจะให้เชื่อมทำอื่น ๆ ต้องควบคุมบ่อหลอมละลายของโลหะให้เล็ก ดังแสดงในรูปที่ 2.6

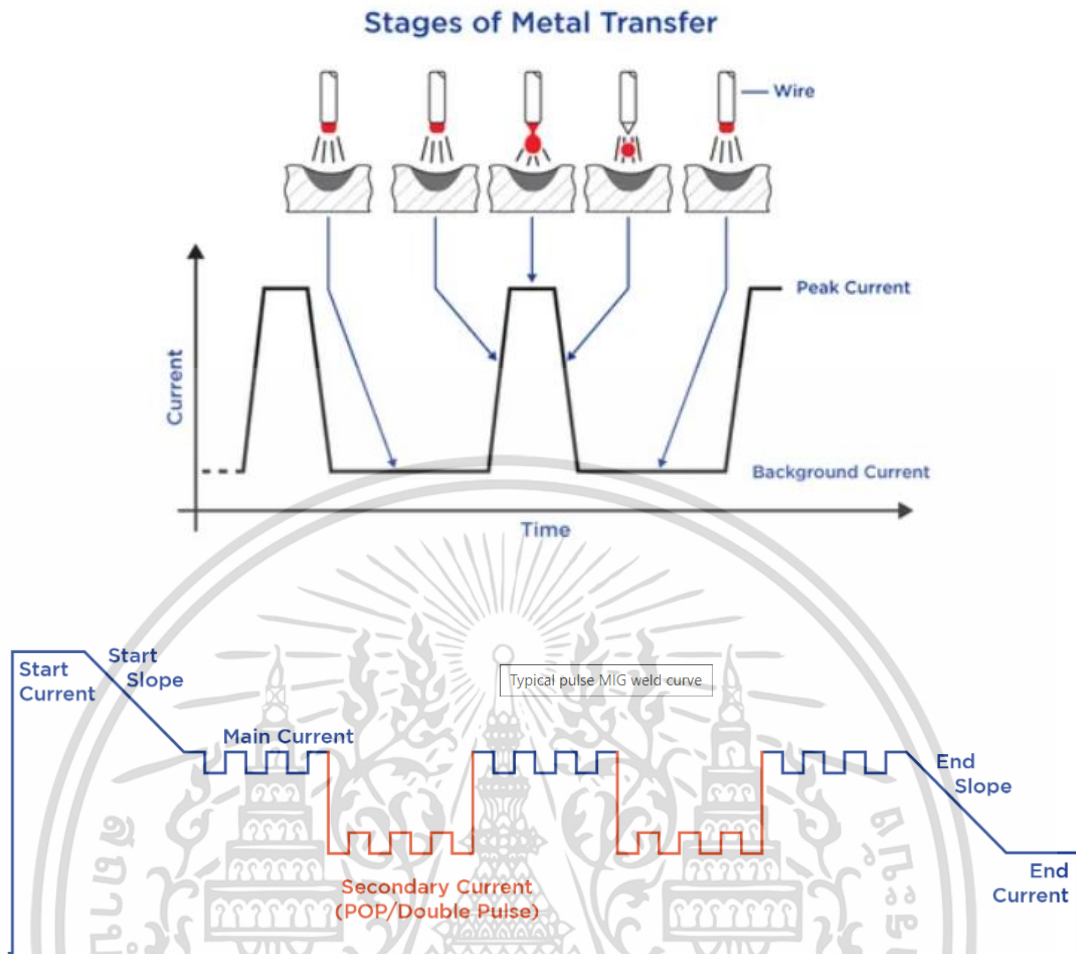
การถ่ายเทโลหะแบบนี้เป็นลักษณะหนึ่งของ Spray Arc โดยใช้กระแสเชื่อมอยู่ในช่วงระหว่าง Spray Arc กับ Short Arc ซึ่งจะทำให้ปลายลวดเชื่อมหลอมละลายก่อนที่จะสัมผัสกับชิ้นงาน แต่เนื่องจากความร้อนที่หลอมปลายลวดเชื่อมนั้นต่ำจึงไม่สามารถทำให้น้ำโลหะที่หลอมละลายที่ปลายลวดเชื่อมนั้นพุ่งออกสู่ชิ้นงานได้ จึงเพียงแต่หลอมรวมตัวอยู่ที่ปลายลวดเชื่อมเป็นก้อนโต กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเชื่อมและอาศัยน้ำหนักของตัวเองตกลงสู่บ่อหลอมละลายของงานเชื่อมการถ่ายเทโลหะแบบนี้จะได้แนวเชื่อมที่ออกมาไม่สวยนักและมีเม็ดโลหะกระเด็นค่อนข้างมาก แต่เหมาะกับการเชื่อมงานหนา ส่วนแก๊สปกคลุมแนวเชื่อมนิยมใช้คือ คาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 2.6 การถ่ายเทโลหะแบบ Spray arc [7]

### 2.3.3 การเชื่อมแบบพัลส์ (Pulsed Transfer)

การถ่ายเทโลหะแบบ pulsed เป็นอีกลักษณะหนึ่งของ Spray Arc ซึ่งได้รวบรวมเอาข้อดีของ Short Arc กับ Spray Arc เข้าด้วยกัน จะได้กระแสเชื่อมที่อยู่ระหว่างช่วงสูงและช่วงต่ำ กระแสในช่วงต่ำจะมีค่าต่ำกว่า Transition Current ในขณะที่กระแสระดับสูงจะสูงกว่า Transition Current และยังเป็นช่วงที่ถ่ายเทโลหะจากปลายลวดเชื่อมสู่บ่อหลอมละลายด้วย สำหรับกระแสช่วงต่ำเป็นกระแสที่ รักษาการอาร์คที่เกิดขึ้นจึงทำให้การถ่ายเทโลหะแบบพัลส์สม่ำเสมอเหมือนกับ Spray Arc แต่ใช้กระแสต่ำกว่าจึงเหมาะกับโลหะบางโดยเฉพาะโลหะอะลูมิเนียม โลหะสแตนเลส โลหะเหล็กกล้าไร้สนิม หรือโลหะที่มีกระบวนการชุบผิวต่างๆ แต่การเชื่อมแบบพัลส์จะต้องใช้แก๊สผสมเท่านั้นคือแก๊สอาร์กอน ลักษณะของแนวเชื่อมที่ได้จะสวยเรียบและแบนกว้างแต่ซึ่มลึกจะไม่ดีเท่ากับแก๊สเฉื่อย การเชื่อมแบบพัลส์ยังสามารถควบคุม การบิดงอของชิ้นงานโลหะได้ดี การเชื่อมด้วยระบบพัลส์จะต้องใช้เครื่องเชื่อมที่ออกแบบเป็นพิเศษโดยเฉพาะในการเชื่อม เพราะโดยปกติของเครื่องเชื่อมโดยทั่วไปจะไม่มีระบบพัลส์จะเป็นแค่ระบบช้อตอาร์คเท่านั้น เพราะเครื่องเชื่อมที่มีระบบพัลส์จะมีราคาสูง



รูปที่ 2.7 ไดอะแกรมการถ่ายเทโลหะแบบพัลส์ [7]

#### 2.3.4 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ )

การใช้  $CO_2$  เป็นแก๊สปกคลุมมักจะเกิดเม็ดโลหะและการอาร์คไม่สม่ำเสมอ แต่เมื่อผสมกับอาร์กอน จะทำให้ปัญหาดังกล่าวลดลง ลักษณะของเปลวอาร์คและแนวเชื่อมจะแตกต่างกันตามความแตกต่างของอัตราส่วนผสมของแก๊สทั้งสอง ส่วนคุณสมบัติเชิงกลนั้นเมื่อใช้แก๊สอาร์กอนผสมกับ  $CO_2$  จะให้ผลดีกว่าการใช้แก๊ส  $CO_2$  อย่างเดียว แก๊สผสมชนิดนี้ใช้กับการเชื่อมเหล็กกล้าซึ่งเชื่อมลึกลงได้ดี แก๊ส  $CO_2$  ซึ่งอยู่ในลักษณะของสารประกอบที่ประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์กับออกซิเจนซึ่งมีใช้เป็นแก๊สเฉื่อยเหมือนกับแก๊สอาร์กอนและแก๊สฮีเลียม ดังนั้นในบริเวณอาร์คที่มีความร้อนสูงจะเกิดออกซิเจนอิสระ เมื่อใช้แก๊ส  $CO_2$  เป็นแก๊สปกคลุมและเปลวอาร์คที่เกิดขึ้นจะกว้างกว่าการใช้แก๊สอาร์กอนแต่จะแคบกว่าการใช้แก๊สฮีเลียม แก๊ส  $CO_2$

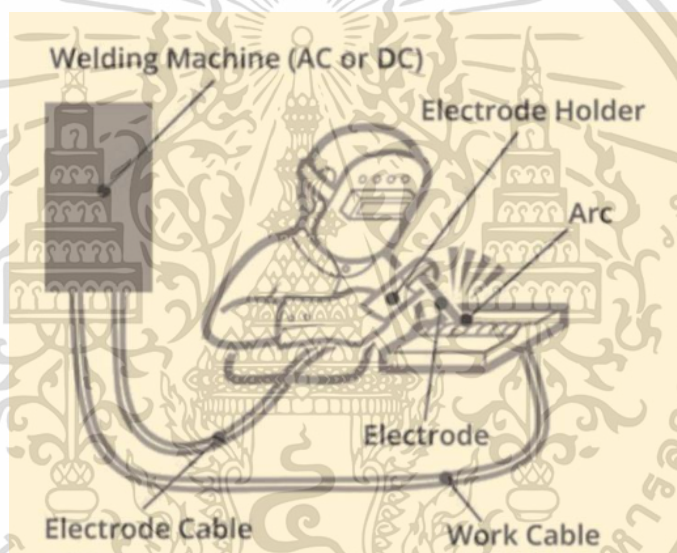
ฉะนั้นแล้วในการทดสอบการเชื่อมในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้การเชื่อมแบบช็อตอาร์คและใช้แก๊ส  $CO_2$  เหตุผลเพราะว่าการเชื่อมแบบช็อตอาร์คและใช้แก๊ส  $CO_2$  ร่วมกันจะทำให้การเชื่อมลึกลงได้ดีกว่าและแก๊ส  $CO_2$  จะมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำ เมื่อเทียบกับการเชื่อมแบบสเปร์อาร์คและการเชื่อมแบบพัลส์ที่ใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แก๊สอาร์กอนในการเชื่อมที่มีจุดหลอมเหลวสูงและให้การซึมลึกไม่ตีเท่ากับการเชื่อมแบบช็อตอาร์ค และใช้แก๊ส  $Co_2$

### 2.3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม (GMAW)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม (GMAW) ประกอบด้วยส่วนสำคัญดังนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.8

- 1 เครื่องเชื่อม (Welding machine)
- 2 เครื่องป้อนลวดและระบบควบคุม (Wire Feeder)
- 3 หัวเชื่อม (Welding Gun & Torch)
- 4 แก๊สปกคลุม (Shielding Gas)
- 5 ลวดเชื่อม (Electrode Wire)



รูปที่ 2.8 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมอาร์คโลหะ [7]

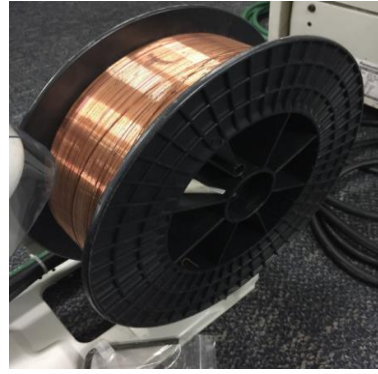
### 2.3.6 เครื่องเชื่อมชนิดลวดแข็งตัน

เครื่องเชื่อมชนิดลวดแข็งตันนั้นเป็นเครื่องเชื่อมที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมเหล็กในอุตสาหกรรมรถยนต์เป็นส่วนใหญ่ โดยลักษณะของเครื่องดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ก) และ (ข) เป็นลักษณะของลวดเชื่อมชนิดลวดแข็งตัน (solid-wire) โดยใช้แรงดันอินพุทกระแสสลับสามเฟสในการป้อนให้กับเครื่อง โดยที่หน้าตู้ของเครื่องเชื่อมสามารถตั้งค่ากระแสการเชื่อมและแรงดันในการเชื่อมได้ โดยที่มีชุดป้อนลวดเป็นตัวขับเคลื่อนลวดลงไปเชื่อมบนชิ้นงาน มีแก๊สเป็นส่วนประกอบในการเชื่อมเพื่อ โล่อากาศไม่ให้เข้าไปในแนวเชื่อม [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.9 ลักษณะเครื่องเชื่อมชนิดลวดแข็งตัน (ก) และ ลวดเชื่อม (ข) โดยที่อ้างอิงจากหัวข้อที่ 1.

## 2.4 วงจรแปลงผันทอนระดับ

วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง-ไฟฟ้ากระแสตรง [8] เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ระดับต่างกัน บ่อยครั้งจะให้เอาต์พุตเรกูเลต วงจรที่จะอธิบายนี้ได้แบ่งออกเป็นวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง-ไฟฟ้ากระแสตรงแบบสวิตช์โหมด หรือเรียกว่า แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิงหรือเรียกว่าตัวสวิตช์ (switch) พื้นฐานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง-ไฟฟ้ากระแสตรง อธิบายการเปลี่ยนแปลงค่าของวงจรบางอย่างที่ใช้ในการออกแบบ แหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้ากระแสตรง การควบคุมองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรงของเอาต์พุตพัลส์ของวงจรชนิดนี้ในรูปที่ 2.10 อาจจะเป็นพอสำหรับการประยุกต์ใช้งานบางอย่าง เช่น การควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรง แต่บ่อยครั้งวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเอาต์พุตเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่มีริบเปิล ทางหนึ่งของการได้มาซึ่งเอาต์พุตไฟฟ้ากระแสตรงจากวงจรในรูปที่ 2.10 เพื่อใส่วงจรกรองความถี่ต่ำหลังสวิตช์ รูปที่ 2.10 แสดงตัวเหนี่ยวนำ-ตัวเก็บประจุ (LC) ในวงจรกรองความถี่ต่ำเพิ่มเข้าไปในวงจรแปลงผันพื้นฐาน ไดโอดให้ทางกระแสตัวเหนี่ยวนำเมื่อสวิตช์เปิดและถูกรีเวิร์สไบอัสเมื่อสวิตช์ปิด วงจรนี้เรียกว่า วงจรทอนระดับแรงดันหรือวงจรลดแรงดัน เพราะแรงดันเอาต์พุตมีค่าน้อยกว่าอินพุต

### 2.4.1 ความสัมพันธ์แรงดันและกระแส

ถ้าวงจรกรองความถี่ต่ำเป็นอุดมคติ แรงดันเอาต์พุตคือค่าเฉลี่ยของแรงดันอินพุตเพื่อวงจรกรองอินพุตเพื่อวงจรกรอง  $V_x$  ในรูปที่ 2.10(ก) มีค่า  $V_s$  เมื่อสวิตช์ปิดและเป็นศูนย์เมื่อสวิตช์เปิด เพื่อให้กระแสตัวเหนี่ยวนำยังคงเป็นบวก เพื่อให้ไดโอดนำกระแส ถ้าสวิตช์ปิดเป็นคาบ ๆ ที่ดีวีดี  $D$  แรงดันเฉลี่ยที่อินพุตวงจรกรองมีค่า  $V_{SD}$  แสดงดังในสมการที่ (2.1)

$$V_o = \frac{1}{T} \int_0^T v_o(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{DT} V_s dt = V_s D \quad (2.1)$$

องค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรงของเอาต์พุตถูกควบคุมโดยการปรับค่าอัตราส่วนดีวีดี  $D$  ซึ่งเป็นสัดส่วนของคาบที่สวิตช์ปิด

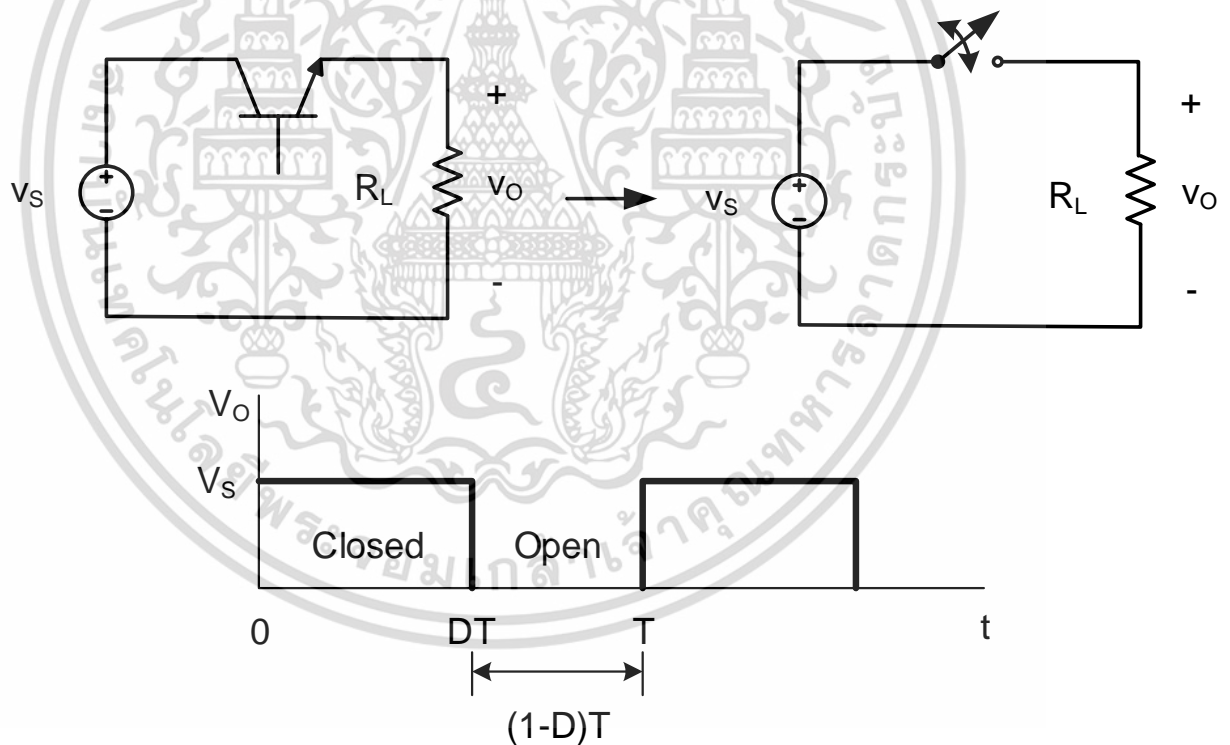
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T} = t_{on} f \quad (2.2)$$

โดยที่  $f$  เป็นความถี่การสวิตช์หน่วยเป็น  $Hz$  องค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรงของเอาต์พุตจะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับอินพุตสำหรับวงจรนี้

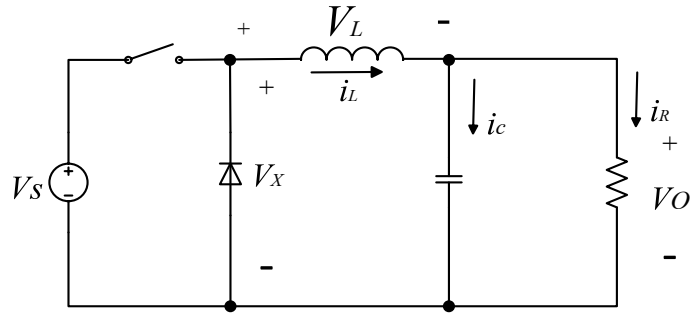
กำลังงานถูกดูดซับโดยสวิตช์อุดมคติมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อสวิตช์เปิด ไม่มีกระแสในตัวมัน เมื่อสวิตช์ปิดไม่มีแรงดันตกคร่อมตัวมัน ดังนั้นกำลังงานทั้งหมดถูกดูดซับโดยโหลดและประสิทธิภาพพลังงานมีค่า 100 % กำลังงานสูญเสียจะเกิดขึ้นในสวิตช์จริง ๆ เพราะแรงดันตกคร่อมมันจะมีค่าไม่เท่ากับศูนย์เมื่อมันนำกระแส และสวิตช์จะต้องผ่านย่านเชิงเส้น เมื่อทำให้เปลี่ยนสถานะจากสถานะหนึ่งเป็นอีกสถานะหนึ่ง

การวิเคราะห์นี้สมมติว่า ไดโอดยังคงเป็นฟอร์เวิร์ดสำหรับเวลาทั้งหมดที่สวิตช์เปิด เป็นนัยว่ากระแสตัวเหนี่ยวนำยังคงเป็นบวก กระแสตัวเหนี่ยวนำยังคงเป็นบวกตลอดคาบการสวิตช์เรียกว่ากระแสต่อเนื่อง ในทางกลับกัน กระแสไม่ต่อเนื่องจะเป็นกระแสตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าเป็นศูนย์ทุก ๆ คาบ

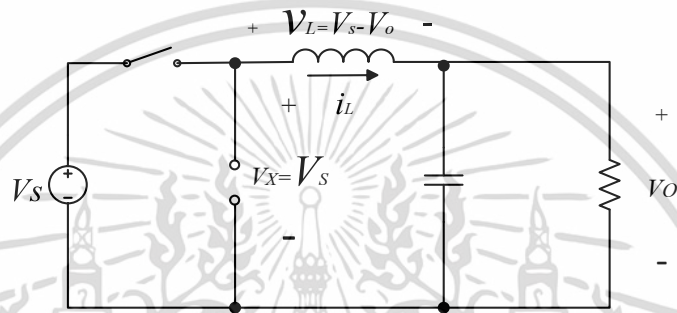


รูปที่ 2.10 วงจรแปลงผันสวิตช์ไฟฟ้ากระแสตรง-ไฟฟ้ากระแสตรงพื้นฐาน

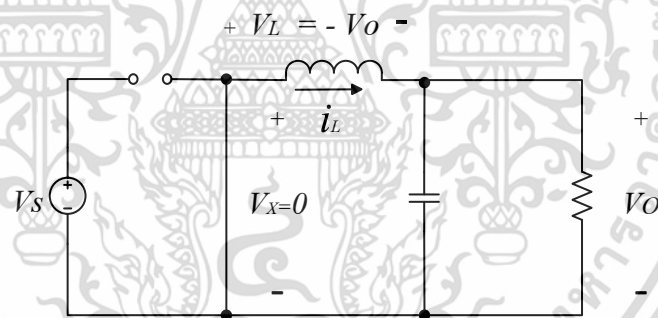
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.11 (ก) วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง-ไฟฟ้ากระแสตรงแบบทอนระดับแรงดัน

(ข) วงจรสมมูลสำหรับสวิตช์ปิด

(ค) วงจรสมมูลสำหรับสวิตช์เปิด

อีกทางหนึ่งของการวิเคราะห์การทำงานของวงจรแปลงผันแบบทอนระดับแรงดันของรูปที่ 2.11(ก) คือการตรวจสอบแรงดันและกระแสตัวเหนี่ยวนำ การวิเคราะห์นี้พิสูจน์เพื่อออกแบบวงจรกรองและวิเคราะห์ห้วงงานจะทำการนำเสนอต่อไปในบทนี้  
วงจรแปลงผันแบบทอนระดับแรงดันและวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง-ไฟฟ้ากระแสตรง โดยทั่วไปมีคุณสมบัติการทำงานในสภาวะอยู่ตัวดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. กระแสตัวเหนี่ยวนำเป็นฟังก์ชันคาบ

$$i_L(t+T) = i_L(t) \quad (2.3)$$

2. แรงดันตัวเหนี่ยวนำเฉลี่ยมีค่าเป็นศูนย์ (กฎสมดุล โวลต์-วินาที)

$$v_L = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} v_L(\lambda) d\lambda = 0 \quad (2.4)$$

3. กระแสตัวเก็บประจุเฉลี่ย มีค่าเป็นศูนย์ (กฎประจุสมดุล)

$$I_C = \frac{1}{C} \int_t^{t+T} i_C(\lambda) d\lambda = 0 \quad (2.5)$$

4. แหล่งจ่ายจ่ายกำลังงานค่าเดียวกับที่จ่ายกำลังงานที่โหลด สำหรับองค์ประกอบไม่อุดมคติ แหล่งจ่ายจะจ่ายกำลังงานสูญเสียด้วย

$$\begin{aligned} P_S &= P_O & , ideal \\ P_S &= P_O + losses & , nonideal \end{aligned} \quad (2.6)$$

การวิเคราะห์ของวงจรแปลงผันแบบทอนระดับแรงดันดังรูปที่ 2.11(ก) เริ่มต้นโดยการสมมติฐาน

1. วงจรการทำงานในสภาวะอยู่ตัว
2. กระแสตัวเหนี่ยวนำต่อเนื่อง (เป็นบวกเสมอ)
3. ตัวเก็บประจุใหญ่มาก ๆ และแรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ที่แรงดัน  $V_o$  การยับยั้งนี้จะถูกปล่อยวางหลังจากนั้นเพื่อแสดงผลของค่าตัวเก็บประจุที่จำกัด
4. คาบการสวิตช์มีค่า  $T$  สวิตช์ปิดที่เวลา  $DT$  และเปิดที่เวลา  $(1-D) T$
5. อุปกรณ์เป็นอุดมคติ

กุญแจเพื่อวิเคราะห์สำหรับการหาแรงดันเอาต์พุต  $V_o$  เพื่อตรวจสอบกระแสเหนี่ยวนำและแรงดันตัวเหนี่ยวนำครั้งแรกของสวิตช์ขณะปิดและหลังจากนั้นสวิตช์เปิด การเปลี่ยนแปลงสุทธิของกระแสตัวเหนี่ยวนำในช่วง 1 คาบเวลาจะต้องเป็นศูนย์สำหรับการทำงานอยู่ตัว แรงดันเหนี่ยวนำเฉลี่ยมีค่าเป็นศูนย์

การวิเคราะห์สำหรับสวิตช์ปิด เมื่อสวิตช์ปิดในวงจรแปลงผันแบบทอนระดับแรงดันของรูปที่ 2.12(ก) ไดโอดจะถูกรีเวิร์สไบอัสและรูปที่ 2.11(ข) เป็นวงจรสมมูล แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำมีค่า

$$v_L = V_S - V_o = L \frac{di_L}{dt}$$

จัดตัวแปร

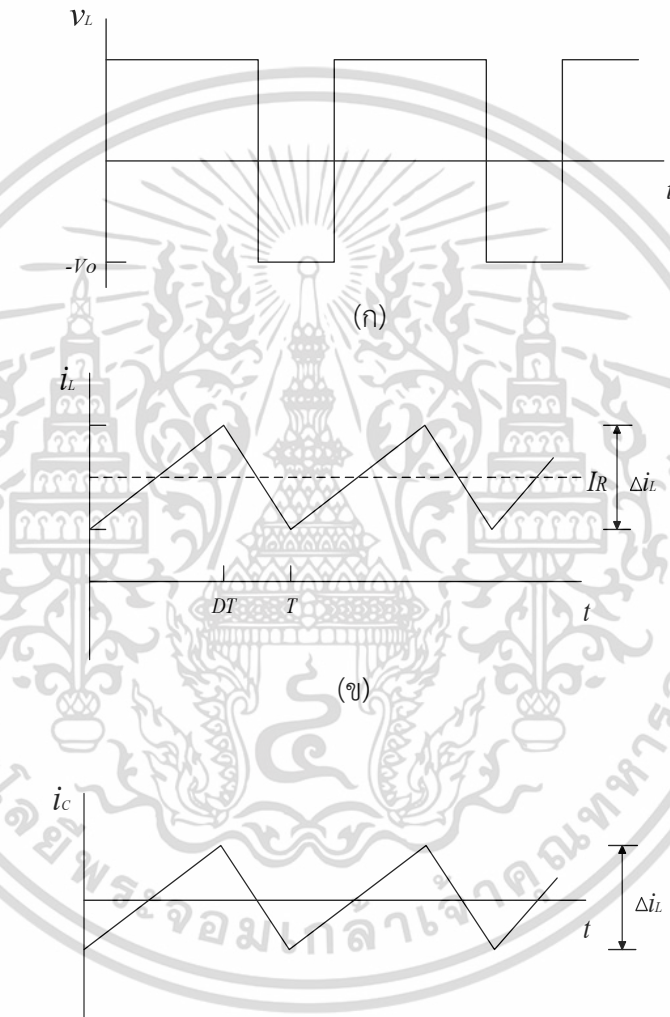
$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_S - V_o}{L} \quad , \text{switch closed}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากอนุพันธ์ของกระแสมีค่าคงที่เป็นบวก กระแสเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นแสดงดังรูปที่ 2.11 (ข) การเปลี่ยนแปลงกระแสขณะสวิตช์ปิดเป็นการคำนวณโดยการปรับเปลี่ยนสมการก่อนหน้า ดังนี้

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_s - V_o}{L}$$

$$(\Delta i_L)_{closed} = \left( \frac{V_s - V_o}{L} \right) DT \quad (2.7)$$



(ค)

รูปที่ 2.12 สัญญาณรูปคลื่นของวงจรทอนระดับแรงดัน

- (ก) แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ
- (ข) กระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำ
- (ค) กระแสผ่านตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์สำหรับสวิตช์เปิด เมื่อสวิตช์เปิด ไดโอดทำงานเป็นฟอร์เวิร์ดไบอัสนำกระแสให้กับตัวเหนี่ยวนำ และวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.11 แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำเมื่อสวิตช์เปิด

$$v_L = -V_o = L \frac{di_L}{dt}$$

จัดตัวแปร

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{V_o}{L}, \text{ switch open}$$

อนุพันธ์ของกระแสตัวเหนี่ยวนำนั้นมีค่าคงที่เป็นลบ และกระแสจะลดลงอย่างเป็นเชิงเส้น แสดงดังรูปที่ 2.12

(ข) การเปลี่ยนแปลงกระแสตัวเหนี่ยวนำเมื่อสวิตช์เปิด

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = -\frac{V_o}{L} \quad (2.8)$$

$$(\Delta i_L)_{open} = -\left(\frac{V_o}{L}\right)(1-D)T$$

การทำงานในสภาวะอยู่ตัวต้องการกระแสตัวเหนี่ยวนำที่การสิ้นสุดของไซเคิลการสวิตช์ซึ่งเป็นค่าเดียวกับจุดเริ่มต้น หมายความว่า การเปลี่ยนแปลงสุทธิในกระแสตัวเหนี่ยวนำในช่วง 1 คาบเวลามีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งจะได้

$$(\Delta i_L)_{closed} + (\Delta i_L)_{open} = 0$$

ใช้สมการที่ (2.7) และ (2.8)

$$\left(\frac{V_s - V_o}{L}\right)DT = -\left(\frac{V_o}{L}\right)(1-D)T = 0$$

แก้สมการสำหรับ  $V_o$

$$V_o = V_s D \quad (2.9)$$

ซึ่งเป็นผลเช่นเดียวกันกับสมการที่ (2.1) วงจรแปลงผันทอนระดับแรงดันสร้างแรงดันเอาต์พุตน้อยกว่าหรือเท่ากับอินพุต

อนุพันธ์ทางเลือกของแรงดันเอาต์พุตเป็นพื้นฐานของแรงดันตัวเหนี่ยวนำแสดงดังรูปที่ 2.12

(ข) เนื่องจากแรงดันตัวเหนี่ยวนำเฉลี่ยมีค่าเป็นศูนย์สำหรับการทำงานฟังก์ชันคาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_L = (V_s - V_o)DT + (-V_o)(1-D)T = 0$$

แก้สมการก่อนหน้าสำหรับ  $V_o$  ให้ผลเหมือนกันกับสมการที่ (2.9) จะได้

$$V_o = V_s D$$

ขอให้จำไว้ว่า แรงดันเอาต์พุตขึ้นอยู่กับแรงดันอินพุต และอัตราส่วนดิวตี้  $D$  ถ้าการแกว่งของแรงดันอินพุต แรงดันเอาต์พุตสามารถควบคุมให้คงที่ได้โดยปรับอัตราส่วนของดิวตี้ให้เหมาะสม ลูปป้อนกลับเป็นที่ต้องการเพื่อแชมปลิงแรงดันเอาต์พุต เปรียบเทียบมันเพื่ออ้างอิงและตั้งค่าอัตราส่วนดิวตี้ของสวิตช์

กระแสเหนี่ยวนำเฉลี่ยจะต้องเหมือนกับกระแสเฉลี่ยของโหลดความต้านทาน เนื่องจากกระแสเฉลี่ยของตัวเหนี่ยวนำจะต้องเป็นศูนย์สำหรับการทำงานสภาวะอยู่ตัว

$$I_L = I_R = \frac{V_o}{R} \quad (2.10)$$

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงกระแสเหนี่ยวนำสามารถรู้ได้จากสมการที่ (2.7) และ (2.8) ค่ามากที่สุดและต่ำสุดของกระแสเหนี่ยวนำคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} I_{\max} &= I_L + \frac{\Delta i_L}{2} \\ &= \frac{V_o}{R} + \frac{1}{2} \left[ \frac{V_o}{L} (1-D)T \right] = V_o \left[ \frac{1}{R} + \frac{(1-D)}{2Lf} \right] \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} I_{\min} &= I_L - \frac{\Delta i_L}{2} \\ &= \frac{V_o}{R} - \frac{1}{2} \left[ \frac{V_o}{L} (1-D)T \right] = V_o \left[ \frac{1}{R} - \frac{(1-D)}{2Lf} \right] \end{aligned} \quad (2.12)$$

โดยที่  $f = 1/T$  เป็นความถี่ของการสวิตช์ หน่วยเป็น  $Hz$

สำหรับการวิเคราะห์ก่อนหน้าก็นำไปสู่ความถูกต้อง กระแสตัวเหนี่ยวนำต่อเนื่องจะต้องถูกพิสูจน์ ซึ่งง่ายต่อการตรวจสอบสำหรับกระแสต่อเนื่องเพื่อคำนวณกระแสตัวเหนี่ยวนำต่ำสุดจากสมการที่ (2.12) เนื่องจากค่าต่ำสุดของกระแสเหนี่ยวนำจะต้องเป็นบวกสำหรับกระแสต่อเนื่อง ค่าต่ำสุดเป็นลบจากสมการที่ (2.12) ไม่ยอมรับเนื่องจากไดโอดและระบุกระแสไม่ต่อเนื่อง วงจรจะทำงานสำหรับกระแสเหนี่ยวนำไม่ต่อเนื่อง แต่การวิเคราะห์ก่อนหน้าก็ไม่ถูกต้อง การทำงานกระแสไม่ต่อเนื่องจะอธิบายในบทนี้ต่อไป

สมการที่ (2.12) สามารถใช้เพื่อหาค่า  $L$  และ  $f$  ที่จะส่งผลให้กระแสต่อเนื่อง เนื่องจาก  $I_{\min} = 0$  เป็นขอบเขตระหว่างกระแสต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{\min} = 0 - V_o \left[ \frac{1}{R} - \frac{(1-D)}{2Lf} \right]$$

$$(Lf)_{\min} = \frac{(1-D)R}{2f} \quad (2.13)$$

ถ้าความถี่การสวิตซ์ที่ต้องการหาค่าได้จาก

$$L_{\min} = \frac{(1-D)R}{2f} \quad \text{สำหรับกระแสต่อเนื่อง} \quad (2.14)$$

โดยที่  $L_{\min}$  เป็นความเหนี่ยวนำต่ำสุดที่ต้องการสำหรับกระแสต่อเนื่อง ในทางปฏิบัติค่าตัวเหนี่ยวนำมากกว่า  $L_{\min}$  เป็นสิ่งที่ต้องการเพื่อให้แน่ใจว่ากระแสต่อเนื่อง

ในการออกแบบวงจรทอนระดับแรงดัน การแปรค่ายอดถึงยอดในกระแสตัวเหนี่ยวนำบ่อยครั้งจะใช้เกณฑ์ของการออกแบบ สมการที่ (2.7) สามารถรวมกับสมการที่ (2.9) เพื่อหาค่าตัวเหนี่ยวนำสำหรับกระแสตัวเหนี่ยวนำยอดถึงยอดที่ระบุสำหรับการทำงานกระแสต่อเนื่อง

$$\Delta i_L = \left( \frac{V_s - V_o}{L} \right) DT = \left( \frac{V_s - V_o}{Lf} \right) D = \frac{V_o(1-D)}{Lf} \quad (2.15)$$

หรือ

$$L = \left( \frac{V_s - V_o}{\Delta i_L f} \right) D = \frac{V_o(1-D)}{\Delta i_L f} \quad (2.16)$$

เนื่องจากอุปกรณ์วงจรแปลงผันสมมติว่าอุดมคติ กำลังงานถูกจ่ายโดยแหล่งจ่ายจะต้องค่าเดียวกับกำลังงานที่โหลดความต้านทานได้รับ

$$P_s = P_o$$

$$V_s I_s = V_o I_o$$

หรือ

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{I_s}{I_o} \quad (2.17)$$

ขอให้จำไว้ว่า ความสัมพันธ์ก่อนหน้านี้คล้ายกับความสัมพันธ์แรงดัน-กระแส สำหรับหม้อแปลงในการประยุกต์ใช้งานกับไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นวงจรแปลงผันทอนระดับแรงดันจะสมมูลกับหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 แรงดันรีปเปลเอาต์พุต

การวิเคราะห์ก่อนหน้านี้ ตัวเก็บประจุถูกสมมติว่าใหญ่มากเพื่อให้แรงดันเอาต์พุตคงที่ ในทางปฏิบัติแรงดันเอาต์พุตไม่สามารถรักษาให้คงที่โดยสมบูรณ์ได้ด้วยค่าตัวเก็บประจุจำกัด การแปรค่าแรงดันเอาต์พุตหรือรีปเปลถูกคำนวณจากความสัมพันธ์แรงดัน-กระแสของตัวเก็บประจุ กระแสตัวเก็บประจุจะได้

$$i_c = i_L - i_R$$

แสดงดังในรูปที่ 2.7(ก) ขณะที่กระแสของตัวเก็บประจุเป็นค่าบวก ตัวเก็บประจุได้ชาร์จ จากคำนิยามของการประจุกระแสไฟฟ้า

$$Q = CV_o$$

$$\Delta Q = C\Delta V_o$$

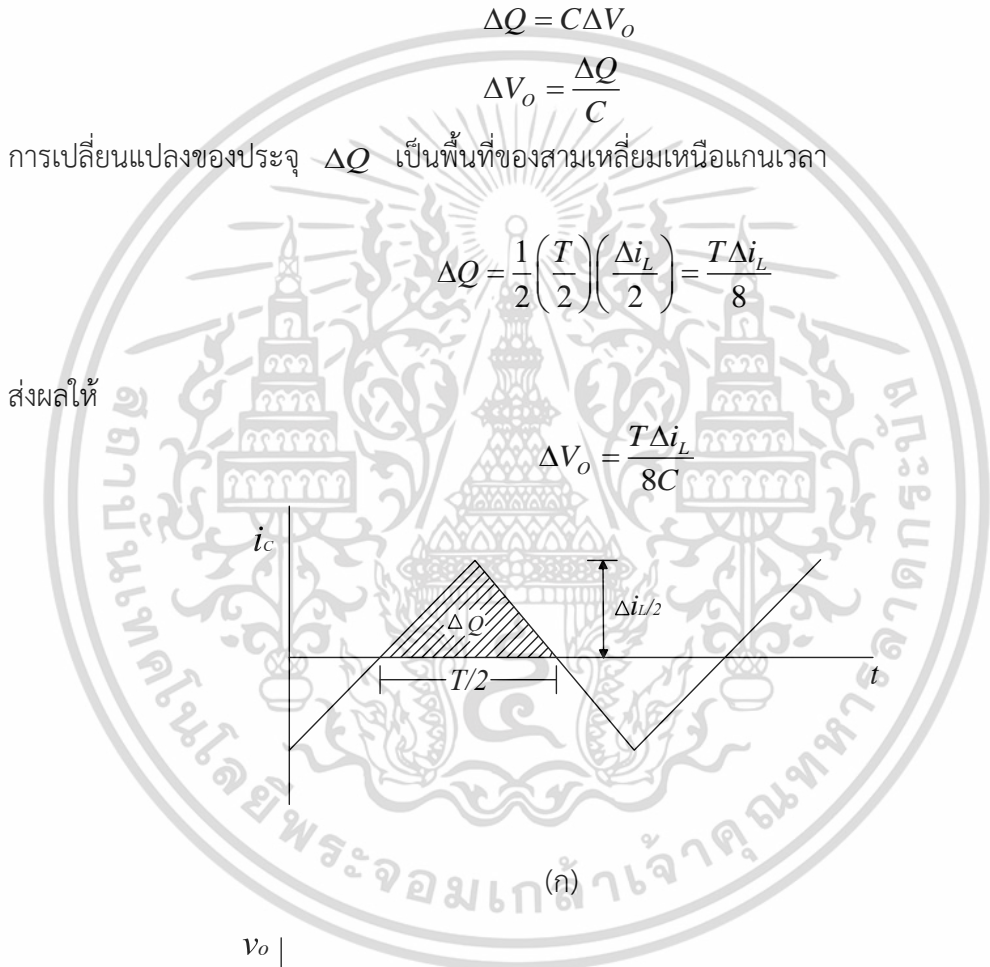
$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C}$$

การเปลี่ยนแปลงของประจุ  $\Delta Q$  เป็นพื้นที่ของสามเหลี่ยมเหนือแกนเวลา

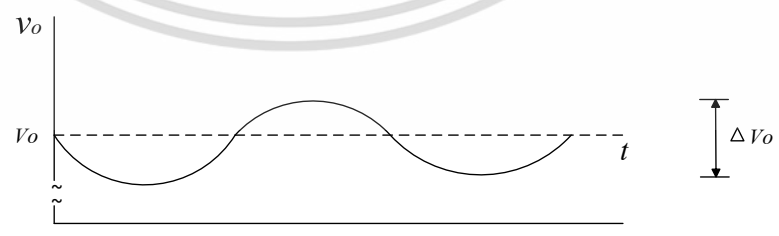
$$\Delta Q = \frac{1}{2} \left( \frac{T}{2} \right) \left( \frac{\Delta i_L}{2} \right) = \frac{T\Delta i_L}{8}$$

ส่งผลให้

$$\Delta V_o = \frac{T\Delta i_L}{8C}$$



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.13 รูปคลื่นของวงจรแปลงผันทอนระดับแรงดัน (ก) กระแสตัวเก็บประจุ (ข) แรงดันรีปเปลของตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยใช้  $\Delta i_L$  จากสมการที่ (2.8) แทนค่า

$$\Delta V_o = \frac{T}{8C} \frac{V_o}{L} (1-D)T = \frac{V_o(1-D)}{8LCf^2} \quad (2.18)$$

สมการนี้  $\Delta V_o$  เป็นแรงดันริปเปิลยอดถึงยอดที่เอาต์พุต แสดงได้ดังรูปที่ 2.13(ข) มันมีประโยชน์อย่างมากที่จะแสดงริปเปิลเป็นสัดส่วนกับแรงดันเอาต์พุต

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1-D}{8LCf^2} \quad (2.19)$$

ในการออกแบบ มันมีประโยชน์ที่จะจัดรูปสมการก่อนหน้าใหม่เพื่อต้องการให้การประจุไฟฟ้าในเทอมของแรงดันริปเปิลโดยเฉพาะ

$$C = \frac{(1-D)}{8L_{\min} f^2 \frac{\Delta V_o}{V_o}} \quad (2.20)$$

ถ้าริปเปิลไม่ใหญ่มาก สมมติแรงดันเอาต์พุตคงที่และการวิเคราะห์ก่อนหน้านี้เป็นจริง

## 2.5 วงจรอินเวอร์เตอร์

วงจรอินเวอร์เตอร์เป็นวงจรเปลี่ยนจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ แน่นอนว่าอินเวอร์เตอร์จะถ่ายเทกำลังงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไปยังโหลดไฟฟ้ากระแสสลับ แต่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับมีอยู่ก่อนในกรณีอื่น ๆ ในการใช้งานอื่น ๆ เป้าหมายจะต้องสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงใช้งานอยู่ อินเวอร์เตอร์ที่สร้างแรงดันเอาต์พุตไฟฟ้ากระแสสลับจากไฟฟ้ากระแสตรง อินเวอร์เตอร์ประยุกต์ใช้งานในงานขับเคลื่อนและปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ แหล่งจ่ายกำลังแบบ UPS และเครื่องมือที่ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับจากแบตเตอรี่มือถือ

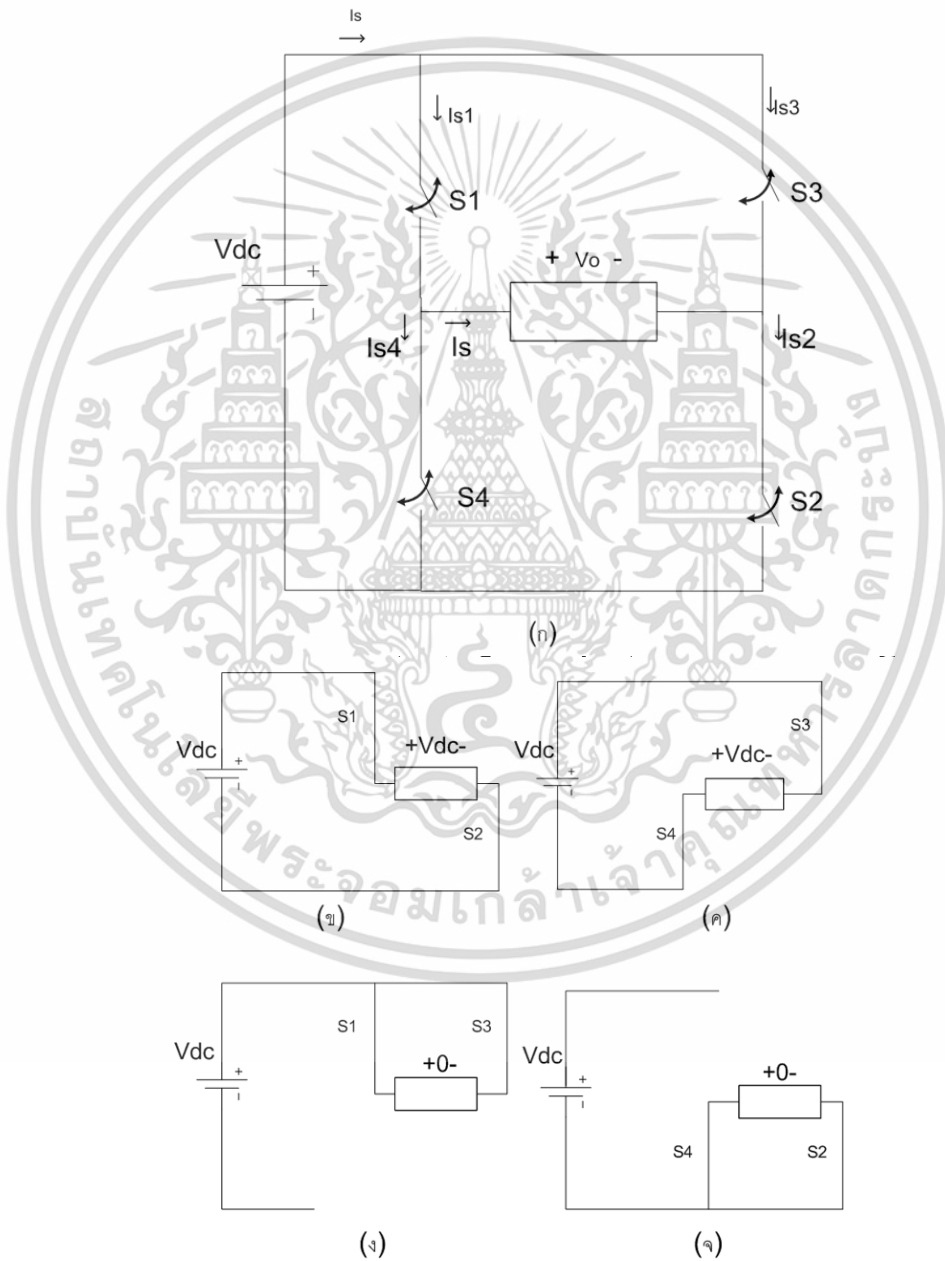
### 2.5.1 วงจรแปลงผันแบบเต็มบริดจ์

วงจรแปลงผันแบบเต็มบริดจ์ ในรูปที่ 2.14(ก) เป็นวงจรพื้นฐานเพื่อใช้เปลี่ยนจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ วงจรแปลงผันแบบเต็มบริดจ์ถูกแนะนำว่าเป็นส่วนหนึ่งของวงจรแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงในการใช้งานนี้ เอาต์พุตไฟฟ้ากระแสสลับจะถูกสร้างจากอินพุตไฟฟ้ากระแสตรงโดยการปิดและเปิดสวิตช์ในลำดับที่เหมาะสม แรงดันเอาต์พุต  $V_o$  สามารถมีค่าเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$+V_{dc}$ ,  $-V_{dc}$  หรือศูนย์ ขึ้นกับว่าสวิตช์จะปิดวงจร รูปที่ 2.14(ข) - (จ) แสดงวงจรสมมูลสำหรับลำดับการสวิตช์

สวิตช์ปิดวงจร	แรงดันเอาต์พุต $v_o$
$S_1$ และ $S_2$	$+V_{dc}$
$S_3$ และ $S_4$	$-V_{dc}$
$S_1$ และ $S_3$	0
$S_2$ และ $S_4$	0



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.14 (ก) วงจรแปลงผันแบบเต็มบริดจ์ (ข)  $S_1$  และ  $S_2$  ปิดวงจร (ค)  $S_3$  และ  $S_4$  ปิดวงจร (ง)  $S_1$  และ  $S_3$  ปิดวงจร (จ)  $S_2$  และ  $S_4$  ปิดวงจร

ขอให้จำไว้ว่า  $S_1$  และ  $S_4$  ไม่ควรที่จะปิดวงจรที่เวลาเดียวกัน และเช่นเดียวกัน  $S_2$  และ  $S_3$  มีเช่นนี้ วงจรจะถูกตัดที่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง สวิตช์ปฏิบัติจะไม่นำกระแสหรือหยุดนำกระแสทันทีทันใด ดังนั้นเวลาการเปลี่ยนการสวิตช์จะต้องอยู่ภายใต้การควบคุมสวิตช์ การที่สวิตช์นำกระแสคาบเกี่ยวกันจะส่งผลให้วงจรเกิดการลัด บางครั้งเรียกว่า ความผิดพลาดจากการยิงทะลุ (shoot-through fault) ตกร่วมแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เวลาที่ว่างสำหรับการสวิตช์เรียกว่า blanking time

## 2.5.2 อินเวอร์เตอร์รูปคลื่นสี่เหลี่ยม

หลักการสวิตช์แบบง่ายที่สุด สำหรับวงจรแปลงผันแบบเต็มบริดจ์เพื่อสร้างแรงดันเอาต์พุตรูปคลื่นสี่เหลี่ยม สวิตช์ต่อโหนดที่  $+V_{dc}$  เมื่อ  $S_1$  และ  $S_2$  ปิดวงจร หรือที่  $-V_{dc}$  เมื่อ  $S_3$  และ  $S_4$  ปิดวงจร สวิตช์ในช่วงคาบเวลาของแรงดันโหนดอยู่ระหว่าง  $+V_{dc}$  และ  $-V_{dc}$  จะสร้างแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ตกร่วมโหนด ถึงแม้ว่าเอาต์พุตเป็นไฟสลับไม่ใช่ไซน์ มันอาจจะเป็นรูปคลื่นไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับการใช้งานบางอย่าง

รูปคลื่นกระแสของโหนดขึ้นกับอุปกรณ์โหนด สำหรับโหนดความต้านทาน รูปคลื่นกระแสจะสอดคล้องกับรูปคลื่นของแรงดันเอาต์พุต โหนดตัวเหนี่ยวนำจะมีกระแสที่มีปริมาณไข่มุกมากกว่าแรงดันเพราะคุณสมบัติการกรองของความเหนี่ยวนำ โหนดตัวเหนี่ยวนำแสดงการพิจารณาบางอย่างในการออกแบบสวิตช์ในวงจรแบบเต็มบริดจ์เพราะกระแสสวิตช์จะต้องอยู่ในสองทิศทาง

สำหรับโหนด RL อนุกรมกันและแรงดันเอาต์พุตรูปคลื่นสี่เหลี่ยม สมมติสวิตช์  $S_1$  และ  $S_2$  ในรูปที่ 2.14 (ก) ปิดวงจรที่  $t=0$  แรงดันตกร่วมโหนดมีค่า  $+V_{dc}$  และกระแสเริ่มต้นที่เพิ่มในโหนด และในสวิตช์  $S_1$  และ  $S_2$  สมการกระแสเป็นผลบวกของการตอบสนองแบบบังคับและธรรมชาติ

$$\begin{aligned} i_o(t) &= i_f(t) + i_n(t) \\ &= \frac{V_{dc}}{R} + Ae^{-t/\tau}, 0 \leq t \leq T/2 \end{aligned} \quad (2.21)$$

โดยที่ A เป็นค่าคงที่ที่ได้จากเงื่อนไขเริ่มต้น และ  $\tau = L/R$  ที่เวลา  $t = T/2$  สวิตช์  $S_1$  และ  $S_2$  ปิดวงจร และ  $S_3$  และ  $S_4$  ปิดวงจร แรงดันตกร่วมโหนด RL จะกลายเป็น  $-V_{dc}$  กระแสจะมีรูปแบบ

$$i_o(t) = -\frac{V_{dc}}{R} + Be^{-(t-T/2)/\tau}, T/2 \leq t \leq T \quad (2.22)$$

โดยที่ ค่าคงที่ B ได้มาจากเงื่อนไขเริ่มต้น

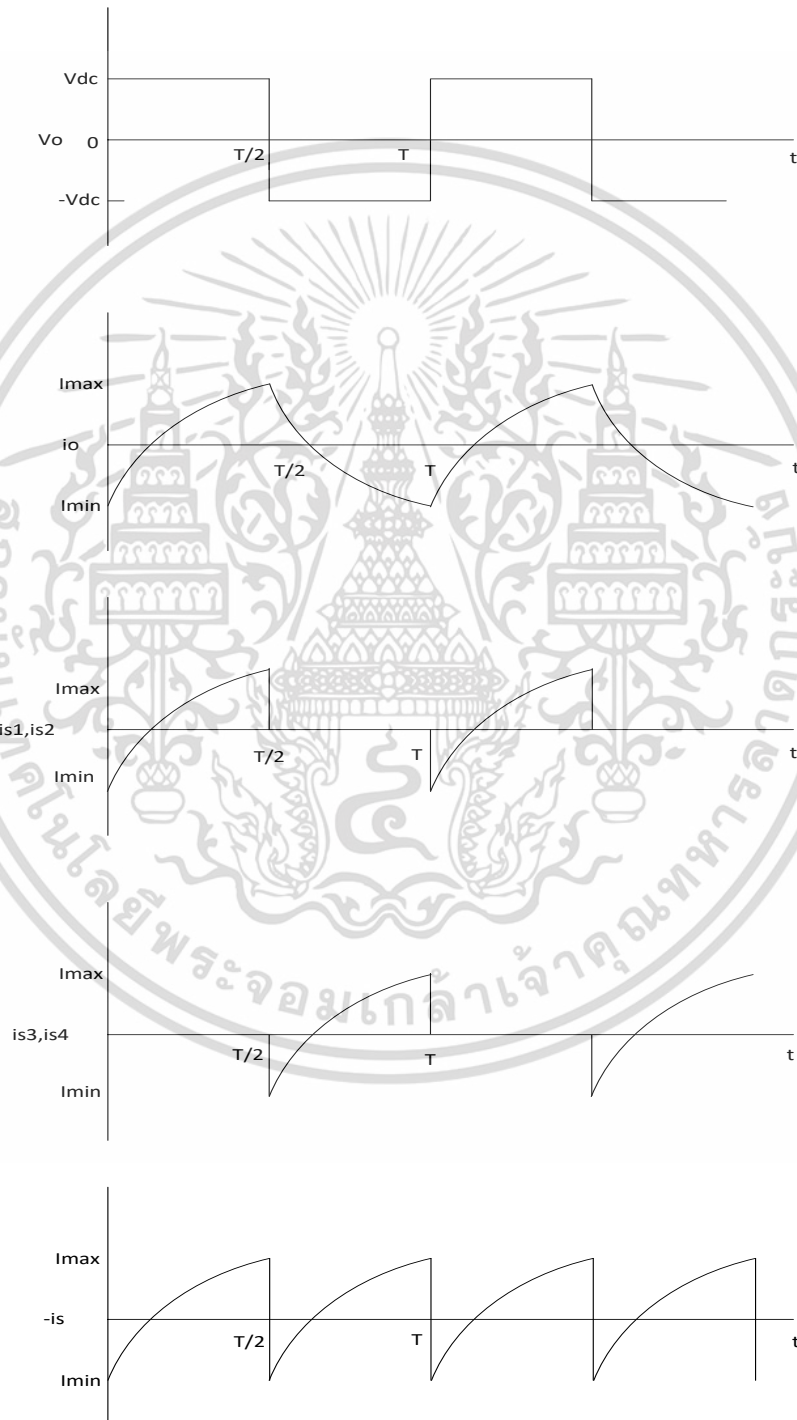
เมื่อวงจรเป็นการกระตุ้นครั้งแรกและกระแสตัวเหนี่ยวนำเริ่มต้นมีค่าเป็นศูนย์ สถานะชั่วครู่เกิดขึ้นก่อนกระแสโหนดจนถึงสถานะอยู่ตัว ที่สถานะอยู่ตัว  $i_o$  เป็นฟังก์ชันคาบและสมมาตรมีค่าเป็นศูนย์ แสดงในรูปที่ 2.11 กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นสำหรับกระแสอธิบายในสมการที่ (2.21) มีค่า  $I_{min}$  และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้เงื่อนไขเริ่มต้นสำหรับกระแสอธิบายในสมการที่ (2.22) มีค่า  $I_{\max}$  สมการที่ (2.21) ที่เวลา  $t=0$

$$i_o(0) = \frac{V_{dc}}{R} + Ae^0 = I_{\min}$$

หรือ

$$A = I_{\min} - \frac{V_{dc}}{R} \quad (2.23)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.15 แรงดันเอาต์พุตรูปคลื่นสี่เหลี่ยมและรูปคลื่นกระแสสถานะอยู่ตัวที่โหลด RL ทำนองเดียวกัน สมการที่ (2.22) ที่เวลา  $t=T/2$

$$i_o(T/2) = \frac{-V_{dc}}{R} + Be^0 = I_{\max}$$

หรือ

$$B = I_{\max} + \frac{V_{dc}}{R} \quad (2.24)$$

ในสถานะอยู่ตัว รูปคลื่นกระแสอธิบาย ด้วยสมการที่ (2.21) และ (2.22) จะกลายเป็น

$$i_o(t) = \begin{cases} \frac{V_{dc}}{R} + \left( I_{\min} - \frac{V_{dc}}{R} \right) e^{-t/\tau} & , 0 < t < T/2 \\ \frac{-V_{dc}}{R} + \left( I_{\max} - \frac{V_{dc}}{R} \right) e^{-(t-T/2)/\tau} & , T/2 < t < T \end{cases} \quad (2.25)$$

สมการที่หา  $I_{\max}$  ได้โดยส่วนแรกของสมการที่ (2.25) ที่เวลา  $t=T/2$

$$i(T/2) = I_{\max} = \frac{V_{dc}}{R} + \left( I_{\min} - \frac{V_{dc}}{R} \right) e^{-(T/2)\tau} \quad (2.26)$$

และเมื่อรูปคลื่นสมมาตร

$$I_{\max} = -I_{\min} = \frac{V_{dc}}{R} \left( \frac{1 - e^{-T/2\tau}}{1 + e^{-T/2\tau}} \right) \quad (2.27)$$

ดังนั้น สมการที่ (2.25) และ (2.28) อธิบายกระแสในโหลด RL ในสถานะอยู่ตัว เมื่อแรงดันรูปคลื่นเป็นสี่เหลี่ยมถูกนำมาใช้ รูปที่ 2.16 แสดงกระแสผลของโหลด แหล่งจ่าย และสวิตช์

กำลังงานดูดซับโดยโหลดสามารถหาได้จาก  $I_{rms}^2 R$  โดยที่กระแสโหลดอาร์เอ็มเอสหาได้จากสมการการอินทิเกรตอาจทำได้ง่ายโดยการนำขอดีของการสมมาตรของรูปคลื่น เนื่องจากกรายกกำลังสองของกระแสในช่วงครึ่งคาบ ซึ่งสมมาตร ดังนั้นครึ่งคาบแรกจำเป็นต้องใช้ในการประเมิน

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{T/2} \left[ \frac{V_{dc}}{R} + \left( I_{\min} - \frac{V_{dc}}{R} \right) e^{-t/\tau} \right]^2 dt} \quad (2.28)$$

ถ้าสวิตช์เป็นอุดมคติ กำลังงานที่จ่ายโดยแหล่งจ่ายจะต้องมีค่าเดียวกับกำลังงานที่ดูดซับโดยโหลด กำลังงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงหาได้จาก

$$P_{dc} = V_{dc} I_s \quad (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

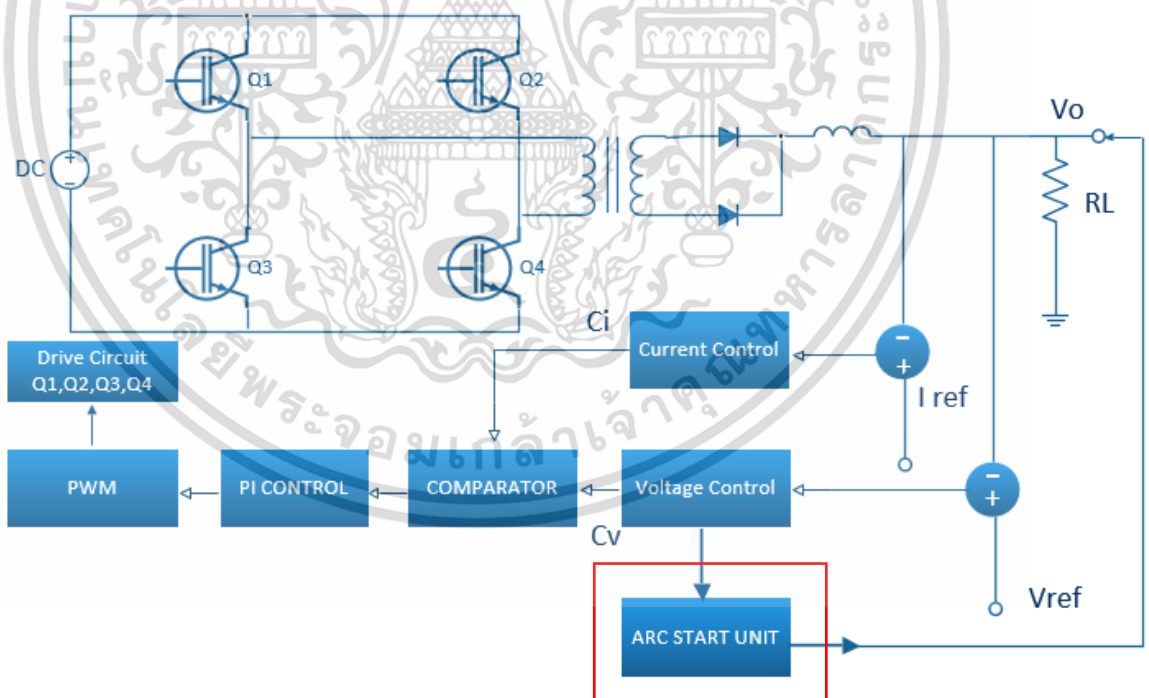
### หลักการการทำงานและการออกแบบ

#### 3.1 บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงหลักการการทำงานของวงจรอาร์คสตาร์ทและการออกแบบวงจรอาร์คสตาร์ทให้เป็นไปตามเป้าหมายและสมมติฐานที่วางไว้ การออกแบบวงจรจะเน้นพิจารณาเฉพาะส่วนที่เกี่ยวข้องกับงานในวิทยานิพนธ์นี้ คือ วงจรอาร์คสตาร์ท ดังจะได้อธิบายในลำดับต่อไป

#### 3.2 โครงสร้างของวงจรอาร์คสตาร์ทและบล็อกไดอะแกรมการทำงาน

ในส่วนนี้จะแสดงโครงสร้างการทำงานโดยรวมเพื่อนำไปสู่การออกแบบของวงจรอาร์คสตาร์ทสำหรับเครื่องเชื่อมชนิดลวดแข็งตัน โดยการออกแบบจะมีส่วนประกอบหลัก ๆ ซึ่งประกอบด้วยวงจรทอนระดับ ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรอาร์คสตาร์ทให้กับเครื่องเชื่อม เพื่อความเข้าใจจึงได้แสดงวงจรอาร์คสตาร์ทในรอบสี่แฉงที่เพิ่มเข้ามาทำงานร่วมกับวงจรเมนหลักของเครื่องเชื่อมชนิดลวดแข็งตัน และสำหรับวงจรบางส่วนของเครื่องเชื่อมชนิดลวดแข็งตันสามารถดูได้ที่ภาคผนวก ข

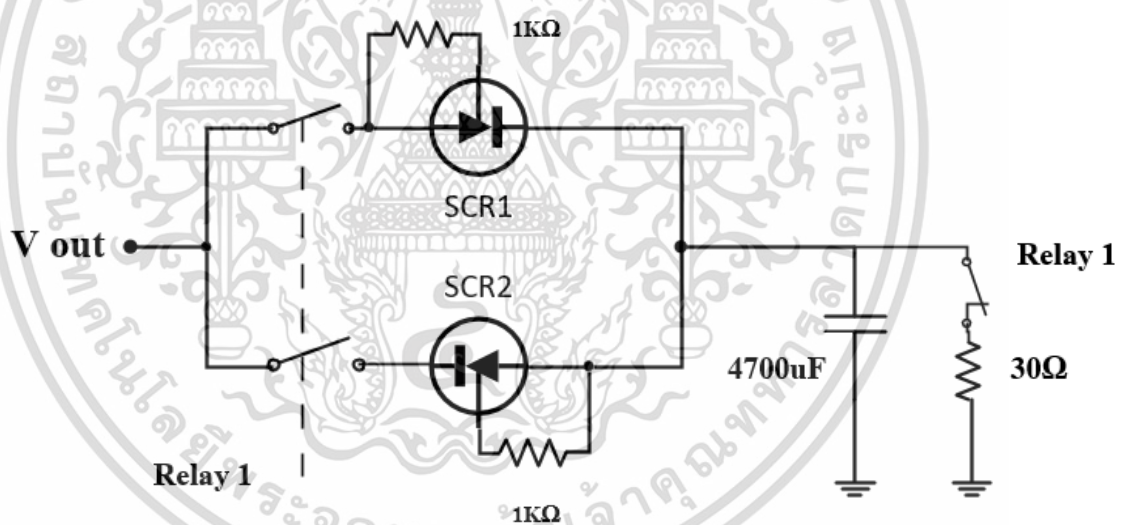


รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องเชื่อมชนิดลวดแข็งตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

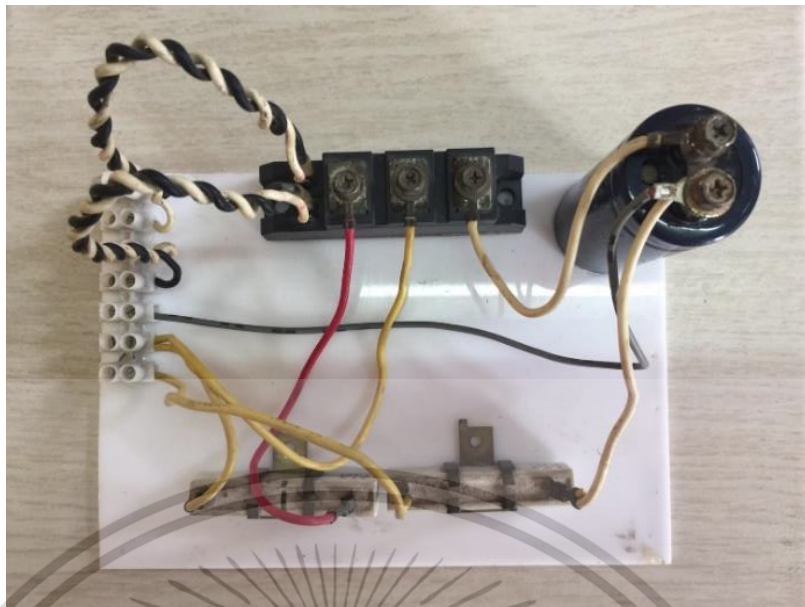
จากรูปที่ 3.1 เป็นบล็อกคอนโทรลไดอะแกรมการทำงานของเครื่องเชื่อมชนิดลวดแข็งตัน โดยจะมีเมนหลักคือวงจรรีเลย์ใช้ IGBT ในการสวิตซ์การทำงานจากแรงดันไฟกระแสตรงไปเป็นแรงดันไฟกระแสสลับหลังจากนั้นจะส่งผ่านพลังงานผ่านหม้อแปลงให้แรงดันลดลง และผ่านไดโอดเรียงกระแส ให้เป็นแรงดันไฟกระแสตรงและแรงดันจะไปสู่อโหลด โดยที่วงจรรภายในของเครื่องเชื่อมชนิดลวดแข็งตันบางส่วนสามารถดูได้ที่ภาคผนวก ข

โดยการทำงานของเครื่องเชื่อมนั้นจะมีการปรับกระแสและแรงดันในการเชื่อมในแต่ละชนิดของชิ้นงานของโลหะไม่ว่าจะเป็นความหนาของเหล็ก ขนาดของลวดหรือชนิดของแก๊สที่ใช้ในการเชื่อมชิ้นงานล้วนมีผลต่อการควบคุมการเชื่อมทั้งสิ้น ฉะนั้นจะต้องมีวงจรควบคุมกระแสและวงจรควบคุมแรงดัน ในการทำให้การเชื่อมนั้นมีลักษณะการเชื่อมที่ดีไม่สะดุด มีการซึมลึกที่ดี และสะเก็ดไฟในการเชื่อมน้อยที่สุดหรือไม่มีสะเก็ดไฟเชื่อมเลย จากนั้นจะเข้าสู่วงจรเปรียบเทียบและเข้าสู่วงจร PI Control เพื่อให้ได้สัญญาณที่คงที่ในการไปควบคุมสัญญาณขับเคลื่อนของ IGBT เพื่อให้ได้แรงดันและกระแสในการเชื่อมที่คงที่



รูปที่ 3.2 โครงสร้างวงจรอาร์คสตาร์ท

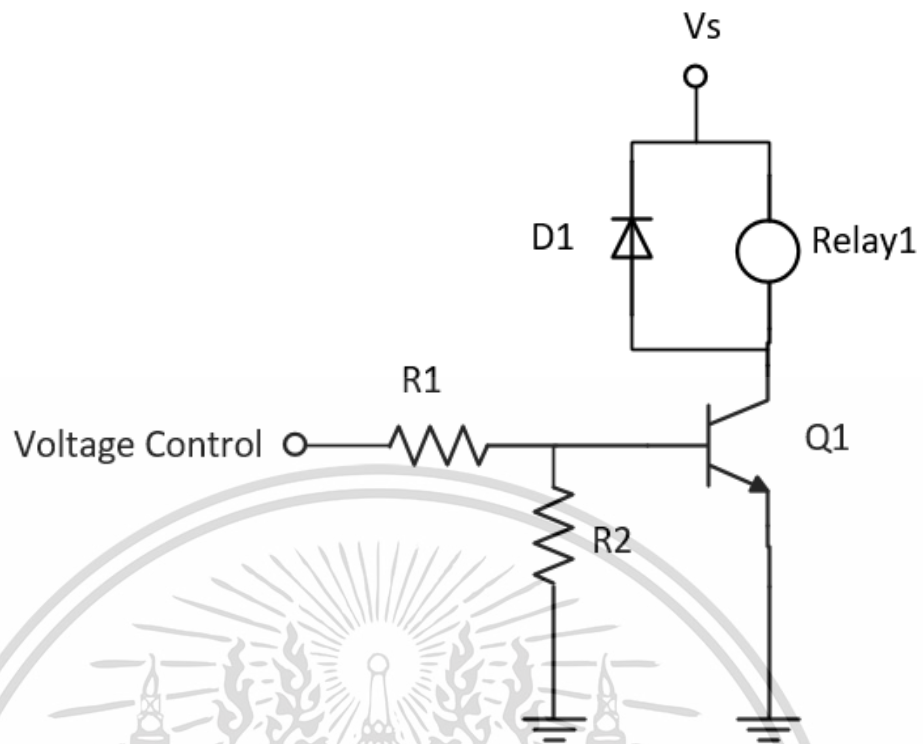
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



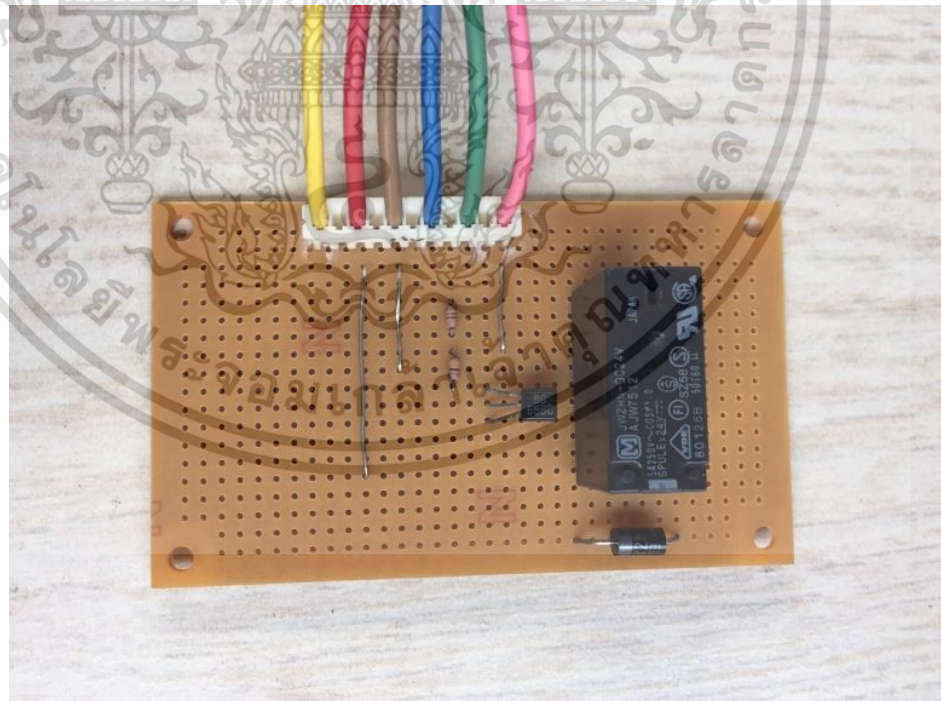
รูปที่ 3.3 วงจรอาร์คสตาร์ทต้นแบบที่ใช้ในการทดลอง

จากรูปที่ 3.2 เป็นโครงสร้างของวงจรอาร์คสตาร์ทที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ โดยหลักการทำงานเบื้องต้นของวงจรอาร์คสตาร์ทคือ โดยวงจรจะประกอบไปด้วย ตัวเก็บประจุ คอนแทกสลิเลย์สำหรับเปิด-ปิด การนำกระแสของสวิตช์กำลัง และสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง SCR ต่อแบบขนานกลับหัว (anti-parallel) ซึ่งเป็นหัวใจหลัก ของวงจร เมื่อเริ่มการทำงาน วงจรอินเวอร์เตอร์ของเครื่องเชื่อมจะจ่ายแรงดันไฟฟ้า ( $V_o$ ) ขณะไม่มีโหลด โดยจะมีค่าแรงดันมาตอนที่ปลายลวดเชื่อมยังไม่แตะชิ้นงาน แรงดันจะอยู่ที่ประมาณ 65 Vdc และมีแรงดันอินพุต  $V_s$  เท่ากับ 240 Vdc และมีดีวีไอเคิล(D)ของการสวิตช์เท่ากับ 0.4 และกระแสสูงสุดของเครื่องเชื่อมอยู่ที่ 350A แรงดันขณะไม่มีโหลดตรงนี้จะเข้าไปจ่ายให้กับวงจรอาร์คสตาร์ท เมื่อกดสวิตช์ออนให้วงจรอินเวอร์เตอร์ของเครื่องเชื่อมทำงานจะมีสัญญาณโวลต์เตจดีเทคจากเครื่องเชื่อมส่งสัญญาณออกมา ลักษณะการต่อสัญญาณโวลต์เตจดีเทคนั้น ดูได้จากรูปที่ 3.7 สัญญาณตรงนี้จะไปขับวงจรขับรีเลย์ของวงจรอาร์คสตาร์ท โดยวงจรขับรีเลย์ดังแสดงในรูปที่ 3.4 เมื่อรีเลย์ 1 ทำงานแรงดันเอาต์พุตของเครื่องเชื่อมที่จะทำให้กระแสไหลผ่าน S1 ซึ่งต่อแบบฟอเวิร์ดไบอัสอยู่และหลังจากนั้นกระแสจะไหลผ่านเข้าตัวเก็บประจุ และตัวเก็บประจุก็จะทำการชาร์จพลังงาน และก็จะคายประจุไหลออกผ่าน S2 พลังงานตอนที่ลวดแตะชิ้นงานที่เป็นโลหะและกระแสที่ได้จากการคายประจุส่งผลให้กระแสไหลไปเอาต์พุตของเครื่องเชื่อมอีกที เมื่อลวดเชื่อมไหลลงแตะชิ้นงานที่เป็นโลหะ แรงดันและกระแสที่ได้จากการคายประจุของวงจรอาร์คสตาร์ทก็จะไปอุ่นชิ้นงาน (preheat) ณ จุดเริ่มต้นเชื่อมให้มีการจุดการอาร์คสตาร์ทที่ยั่งยืน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

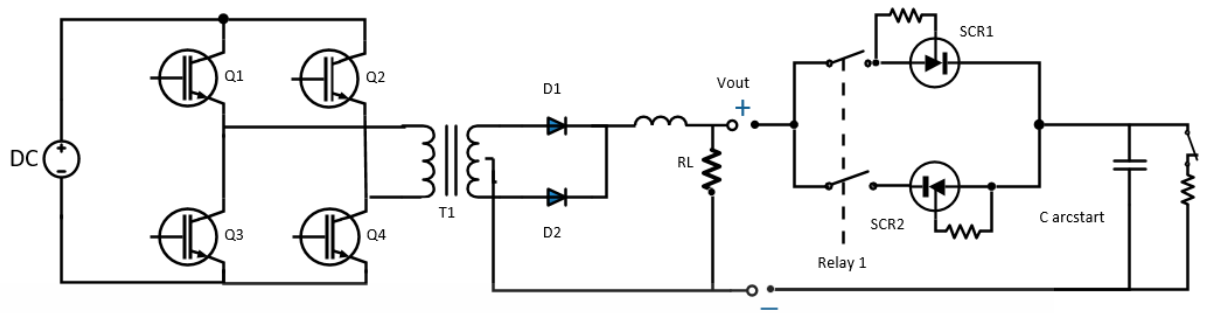


รูปที่ 3.4 โครงสร้างวงจรขับรีเลย์วงจรอาร์คสตาร์ท

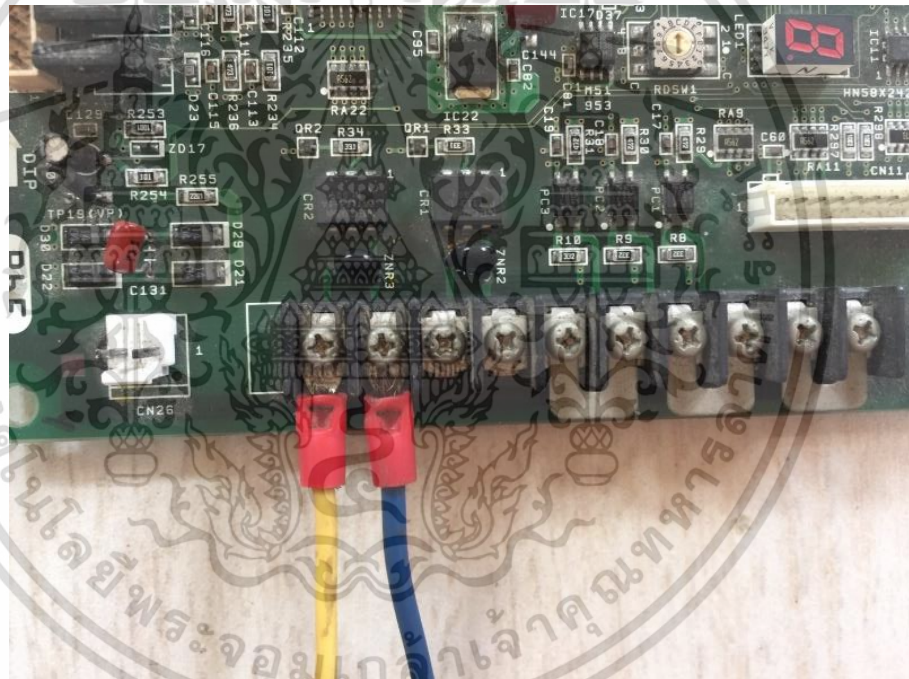


รูปที่ 3.5 รูปวงจรต้นแบบขับรีเลย์วงจรอาร์คสตาร์ท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 ลักษณะการต่อวงจรอาร์สตาร์ทที่เข้าร่วมกับวงจรอินเวอร์เตอร์



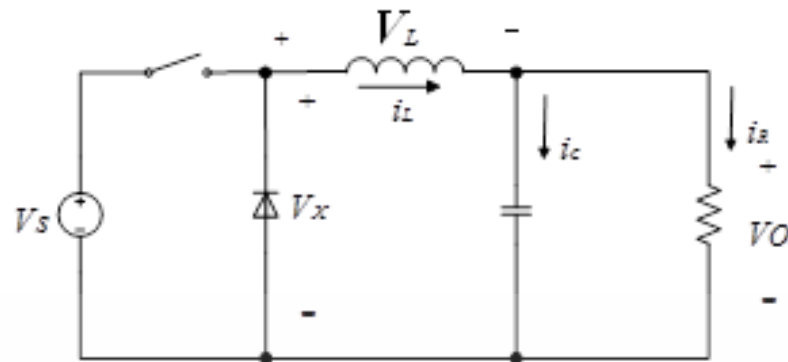
รูปที่ 3.7 ลักษณะการต่อสัญญาณโวลต์เตจคอนโทรลจากเครื่องเชื่อมไปขับวงจรรีเลย์

โดยที่ตัวที่ใช้เคิลของวงจอินเวอร์เตอร์หาได้จากสมการที่ 3.1

$$\frac{V_o}{V_s} = 2aD \quad (3.1)$$

โดยที่ a คือ Turn ratio ของหม้อแปลงอินเวอร์เตอร์ = 3/1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 วงจรทอนระดับแรงดัน

วงจรอาร์คสตาร์ทที่เปรียบเสมือนเป็นวงจรที่ทำหน้าที่ทอนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง(buck Circuit) ดังในรูปที่ 3.8 โดยในการออกแบบนั้นให้อินพุตของวงจรอาร์คสตาร์ทเท่ากับ 65 VDC (เอาพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ขณะไม่มีโหลด) และต้องการเอาพุตเท่ากับ 25 VDC ตกร่วมโหนดความต้านทาน  $30\Omega$  แรงดันริบเปิลเอาต์พุตจะต้องไม่เกิน 0.5% โดยที่ดิวตี้ไซเคิลในวงจรทอนระดับแรงดันหาได้จาก สมการที่ 3.2

$$D = \frac{V_o}{V_s} = \frac{25}{65} \quad (3.2)$$

โดยที่ค่า D ที่ได้มีค่าเท่ากับ 0.38

วงจรนี้จะทำหน้าที่ทอนระดับแรงดันขณะจ่ายกลับสู่ภาระทางไฟฟ้า ดังนั้นการเลือกใช้ค่าตัวเหนี่ยวนำ จึงจำเป็นต้องเลือกค่าที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถทำงานได้แบบกระแสต่อเนื่องในทั้งสองลักษณะการทำงาน โดยสามารถคำนวณค่า ตัวเหนี่ยวนำ  $L_{min}$  ที่สามารถทำงานแบบกระแสต่อเนื่องได้ในวงจรทอนระดับ โดยมีแรงดันไฟฟ้าขาออกของเครื่องเชื่อมขณะไม่มีโหลด  $V_o$  มีค่าเท่ากับ 65 Vdc ความถี่ (f) ของเครื่องเชื่อมมีค่าเท่ากับ 16 KHz (เป็นความถี่ที่ทำมาจากบริษัทผู้ผลิตเครื่องเชื่อม) ความถี่การสวิตช์และขนาดตัวเหนี่ยวนำจะต้องถูกเลือกเพื่อให้ทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง งานสูญเสียที่สวิตช์มีค่าน้อย ขนาดตัวเหนี่ยวนำต่ำสุดหาได้จากสมการที่ 3.3

$$L_{min} = \frac{(1-D)R}{2f} = \frac{(1-0.38)}{2(16 \times 10^3)} \quad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์  $L_{\min}$  จะได้ = 65  $\mu\text{H}$

จากนั้นคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุ (C) ของวงจรอาร์คสตาร์ทได้จากสมการที่ 3.4 [4]

$$C = \frac{(1-D)}{8L_{\min}f^2 \frac{\Delta V_o}{V_o}} \quad (3.4)$$

$$= \frac{(1-0.38)}{8(65 \times 10^{-6})(16 \times 10^3) \frac{0.5}{25}}$$

โดยที่  $\Delta V_o$  เป็นค่าระลอกคลื่นของแรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ 0.5 V

เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์จะได้ค่า  $C = 4,700 \mu\text{F}$

โดยที่	$L_{\min}$	คือ	ค่าตัวเหนี่ยวนำที่ต่ำที่สุด
	$D$	คือ	ค่าดีวตี้ไซเคิล
	$f$	คือ	ความถี่สวิตชิง
	$V_s$	คือ	แรงดันไฟฟ้าขาเข้า
	$V_o$	คือ	แรงดันไฟฟ้าขาออก
	$I_o$	คือ	กระแสไฟฟ้าขาออก
	$\Delta V_o$	คือ	อัตราระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าขาออก

### 3.3 อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ในวงจรอาร์คสตาร์ท

ในส่วนของอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ในวงจรอาร์คสตาร์ทเพื่อเป็นสวิตช์เปิด-ปิดวงจรนั้นได้เลือกใช้ SCR เป็นตัวสวิตช์ให้กับวงจรอาร์คสตาร์ทเบอร์ PK25F-40 ซึ่งเป็น SCR แบบโมดูลแพค 2 ตัวในหนึ่งโมดูล ต่อแบบขนานกลับหัวกัน (anti-parallel) ซึ่งได้แสดงในรูป 3.9 โดยคุณลักษณะทางไฟฟ้าของ SCR นั้นสามารถดูได้ที่ภาคผนวก ค



รูปที่ 3.9 อิเล็กทรอนิกส์กำลังในงานวิจัย

### 3.4 คอนแทคทีป หรือ อิเล็กโทรด

สิ่งที่สำคัญอย่างหนึ่งในการเชื่อมก็คือคอนแทคทีปหรืออิเล็กโทรดที่ใช้ในการเชื่อมชิ้นงานนั้นมีลักษณะดังรูปที่ 3.10 โดยส่วนมากมักจะเป็นทองแดง เพราะอิเล็กโทรดนั้นเป็นส่วนปลายสุดของการส่งลวดเชื่อมออกไปแตะชิ้นงานและปลายสุดที่กระแสและแรงดันจากเครื่องเชื่อมถูกส่งออกไปให้ลวดเชื่อม ซึ่งมีหลายขนาดขึ้นอยู่กับขนาดของลวดเชื่อมที่นำไปเชื่อมชิ้นงาน และแต่ละขนาดความต้านทานของตัวนำก็จะต่างกัน โดยที่ความต้านทานของอิเล็กโทรดแต่ละขนาดดูได้จากตารางที่ 3.1 และสภาพการนำไฟฟ้าของสารแต่ละชนิดดูได้จากตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ค่าความต้านทานของคอนแทคทีปแต่ละขนาด

ขนาด	ค่าความต้านทาน ( $\Omega$ )
0.9 mm	0.1224
1.0 mm	0.1175
1.2 mm	0.1072

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 คอนแทคทึป หรือ อิเล็กโทรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ตารางความต้านทานและการนำไฟฟ้าของตัวนำแต่ละชนิดที่ 20 ° C

วัสดุ	$\rho$ ( $\Omega \cdot m$ ) ที่ความต้านทาน 20 ° C	$\sigma$ (S / m) ที่ 20 ° C การนำไฟฟ้า
เงิน	$1.59 \times 10^{-8}$	$6.30 \times 10^7$
ทองแดง	$1.68 \times 10^{-8}$	$5.96 \times 10^7$
ทองแดงอบ	$1.72 \times 10^{-8}$	$5.80 \times 10^7$
ทอง	$2.44 \times 10^{-8}$	$4.10 \times 10^7$
อลูมิเนียม	$2.82 \times 10^{-8}$	$3.5 \times 10^7$
แคลเซียม	$3.36 \times 10^{-8}$	$2.98 \times 10^7$
ทังสเตน	$5.60 \times 10^{-8}$	$1.79 \times 10^7$
สังกะสี	$5.90 \times 10^{-8}$	$1.69 \times 10^7$
นิกเกิล	$6.99 \times 10^{-8}$	$1.43 \times 10^7$
ลิเทียม	$9.28 \times 10^{-8}$	$1.08 \times 10^7$

โดยที่สามารถหาค่าความต้านทานของตัวนำแต่ละชนิดได้จากสมการที่ 3.5

$$R = \frac{l}{A\sigma} \quad (3.5)$$

โดยที่  $l$  คือ ความยาวของตัวนำ เมตร ( $m$ )  
 $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวนำไฟฟ้า ตารางเมตร ( $m^2$ )  
 $\sigma$  คือ สภาพตัวนำไฟฟ้า โอห์ม-เมตร ( $\Omega \cdot m$ )

ปัจจัยที่มีผลต่อการนำไฟฟ้า

มีปัจจัยหลักสามประการที่ส่งผลต่อการนำไฟฟ้าหรือความต้านทานของวัสดุ

1. พื้นที่หน้าตัด : หากหน้าตัดของวัสดุมีขนาดใหญ่ก็สามารถปล่อยให้กระแสไหลผ่านได้มากขึ้น ในทำนองเดียวกันหน้าตัดบาง ๆ จะจำกัด การไหลของกระแส
2. ความยาวของตัวนำ : ตัวนำสั้นช่วยให้กระแสไหลในอัตราที่สูงกว่าตัวนำยาว มันเหมือนกับ การพยายามเคลื่อนย้ายผู้คนจำนวนมากผ่านโถงทางเดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. อุณหภูมิ : อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิของสื่อนหรือเคลื่อนที่มากขึ้น การเพิ่มการเคลื่อนไหวนี้ (อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น) จะลดการนำไฟฟ้าเนื่องจากโมเลกุลมีแนวโน้มที่จะเข้ามาขวางการไหลของกระแส ที่อุณหภูมิต่ำมากวัสดุบางชนิดเป็นตัวนำยิ่งยวด

ฉะนั้นแล้วในการเชื่อมชิ้นงานที่มีขนาดของลวดเชื่อมต่างกันควรเลือกอิเล็กโทรดที่เหมาะสมกับลวดเชื่อมด้วยเพื่อประสิทธิภาพในการเชื่อมที่ดี

### 3.5 โลหะที่นำมาใช้ในการทดลอง

ในการทดลองการเชื่อมในงานวิจัยได้เลือกใช้เหล็กชนิด SPCC ซึ่งเป็นเหล็กเกรดเชิงพาณิชย์ของเหล็กกล้ารีดเย็นที่กำหนดโดยมาตรฐานการผลิตของญี่ปุ่น JIS G 3141 ซึ่งเทียบเท่ากับเกรดของจีน Q195 และ Q215A ซึ่งลักษณะของเหล็กนั้นจะมีลักษณะพื้นผิวที่ขามันวาว หรือโดยทั่วไปจะเรียกว่าเหล็กขาว[9]

ตารางที่ 3.3 ตารางคุณสมบัติทางกลของเหล็กชนิด SPCC [9]

ความแข็งแรงของผลผลิต	ความต้านทานแรงดึง	การยืดตัว (ความหนา)	
140-280	$\geq 270$	0.25-2.5 mm	$> -2.5\text{mm}$
		$> 34$	$> 34$

ความต้านแรงดึงอย่างน้อย  $270 \text{ N/mm}^2 (\text{MPa})$ ; ในขณะที่กำลังการยืดตัวอยู่ที่  $\leq 240 \text{ N/mm}^2$  โดยมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าคือ ความต้านทานไฟฟ้า:  $1.43\text{E}-7 - 1.74\text{E}-7 \ \Omega \cdot \text{m}$  ที่  $20 \text{ }^\circ\text{C}$

โดยทั่วไปจะใช้เหล็กม้วนรีดเย็นสำหรับงานที่ต้องการความคลาดเคลื่อนที่ใกล้เคียง ความแข็งแรงสูง และคุณภาพผิวสำเร็จสูง นอกจากนี้ยังเป็นโลหะฐานของขดลวดเหล็กชุบสังกะสีส่วนประกอบของรถยนต์ เช่น

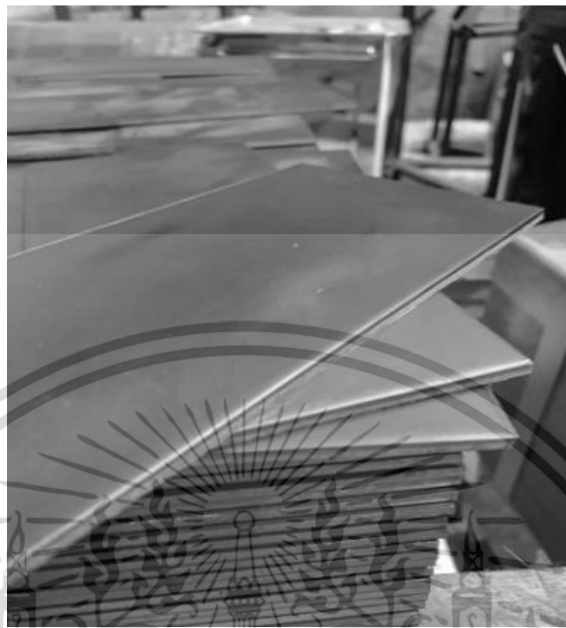
1. ชิ้นส่วนที่ทนต่อการกัดกร่อนของรถยนต์ เป็นต้น
2. อุตสาหกรรมเบา เช่น เครื่องใช้ภายในบ้าน ปล่องไฟ เครื่องใช้ในครัว เป็นต้น
3. ใช้ในการก่อสร้าง เช่น แผงหลังคา ตะแกรงหลังคา เป็นต้น
4. โลหะฐานทำด้วยเหล็กเคลือบสี สังกะสี หรือเหล็กกล้าวาลูม

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติความร้อนของเหล็กชนิด SPCC [9]

ค่าสัมประสิทธิ์ การขยายตัวทางความร้อน	อุณหภูมิสูงสุด	จุดหลอมเหลว	ความจุความร้อน เฉพาะเจาะจง	การนำความร้อน
$1.32\text{E}-5 - 1.38\text{E}-1/\text{K}$ ที่ $20^\circ\text{C}$	$500^\circ\text{C}$	1480-1526 $^\circ\text{C}$	465-483J/(ก ก )K ที่ $20^\circ\text{C}$	36-54W/(m.K)ที่ $20^\circ\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 เหล็กชนิด SPCC ที่ใช้ในงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

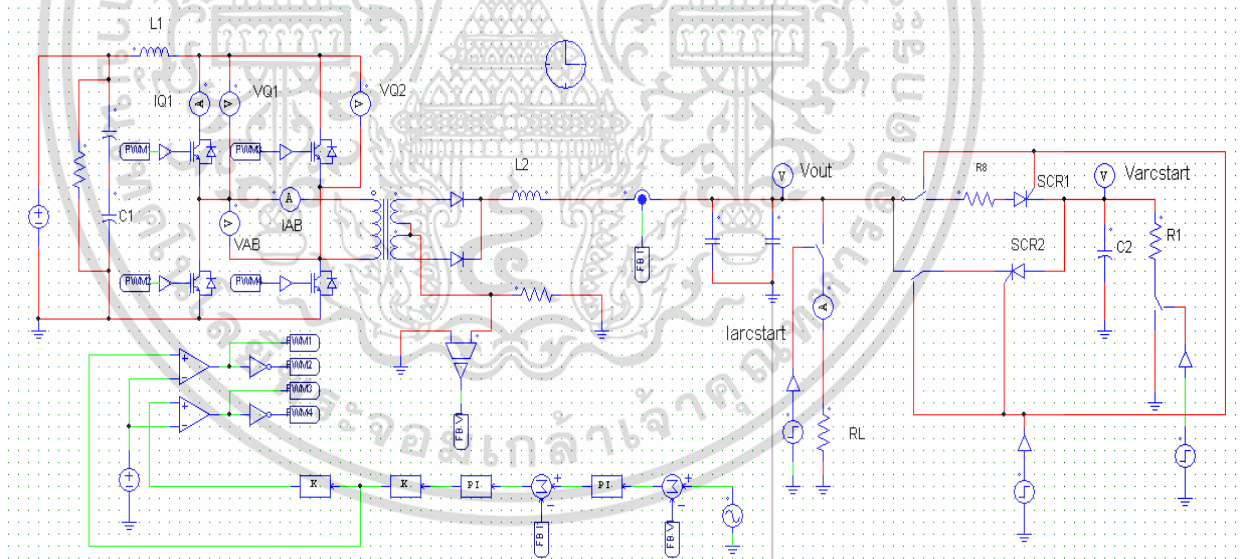
### การจำลองการทำงาน และผลลัพธ์การทดลอง

#### 4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทำงานของวงจรอาร์คสตาร์ทที่ซึ่งผลการจำลองผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของวงจร และการทดลองวงจรอาร์คสตาร์ทกับเครื่องเชื่อมชนิดลวดแข็งต้น รวมทั้งการเชื่อมบนชิ้นงานจริงเพื่อดูผลของการชิมลิกทั้งแบบมีและไม่มีวงจรอาร์คสตาร์ท ตลอดจนการตัดชิ้นงานที่จุดเริ่มต้นเชื่อมเพื่อดูความชิมลิกของชิ้นงานเปรียบเทียบกับว่ามีความชิมลิกต่างกันมากน้อยเพียงใด

#### 4.2 การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

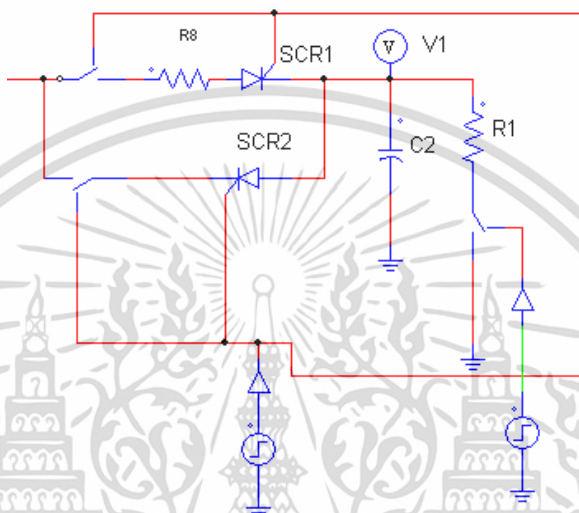
วงจรอาร์คสตาร์ทที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจรเพื่อดูผลลัพธ์ของสัญญาณมีลักษณะดังรูปที่ 4.1 โดยจุดการวัดสัญญาณกระแสของวงจรอาร์คสตาร์ทคือตำแหน่ง RL ซึ่ง RL ในวงจรนี้เปรียบเสมือนอิเล็กโทรด มีค่าเท่ากับ 0.1 โอห์ม โดยจะมีการวัดกระแสอาร์คสตาร์ท ที่ไหลผ่าน RL โดยแรงดันเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์จะวัดที่จุด  $V_{out}$  สามารถดูตำแหน่งการวัดสัญญาณของการจำลองได้ที่รูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ลักษณะวงจรอาร์คสตาร์ทที่ใช้ในการจำลองการทำงานร่วมกับวงจรอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

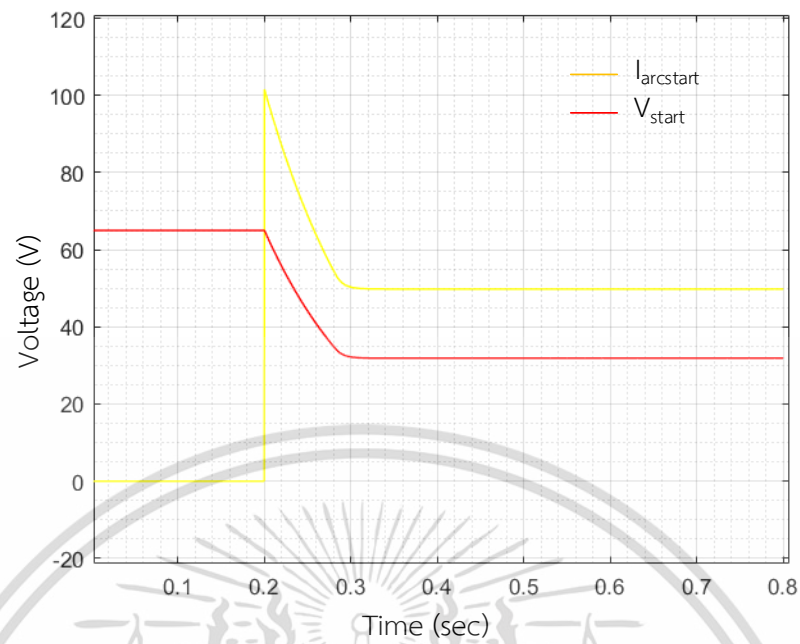
การจำลองและการทดลองการทำงานของวงจรอาร์คสตาร์ทนี้ ทำขึ้นเพื่อศึกษาผลการทำงานของวงจรตลอดจนผลการทดลองเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง โดยกำหนดให้ SCR1 และ SCR2 เป็นสวิตช์ของวงจรอาร์คสตาร์ทซึ่งในวงจรใช้เป็นไทรสเตอร์ และ C2 เป็นคาปาซิเตอร์สำหรับคายประจุเพื่อถ่ายเทกระแสลงบนชิ้นงานที่เป็นเหล็กขณะเริ่มต้นเชื่อมเพื่อไปอุ่นชิ้นงาน ค่าในวงจรมีค่าเท่ากับ 4,700 uF 80 V ความถี่ในการสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ของเครื่องเชื่อมมีค่าเท่ากับ 16kHz โดยลักษณะการต่อวงจรอาร์คสตาร์ทในโปรแกรมคอมพิวเตอร์สามารถดูได้จากรูปที่ 4.2



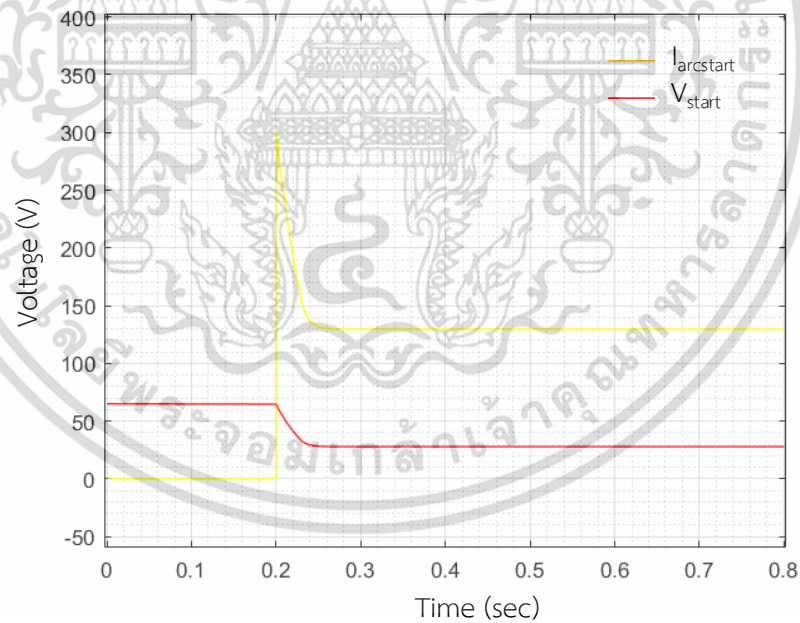
รูปที่ 4.2 ลักษณะวงจรอาร์คสตาร์ทที่ใช้ในการจำลอง

#### 4.2.1 ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในส่วนนี้เป็นผลจากการจำลองผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยในรูปที่ 4.3 เป็นผลการจำลองการเริ่มต้นเชื่อมแบบไม่มีวงจรอาร์คสตาร์ท เส้นสีน้ำเงินเป็นแรงดันเอาต์พุตสูงสุดตอนไม่มีโหลดของเครื่องเชื่อมขณะเริ่มต้นทำงาน และเส้นสีแดงเป็นกราฟกระแสของจุดเริ่มต้นเชื่อมจะเห็นว่าจากการจำลองเมื่อมาถึงช่วงเวลาที่ลวดแตะชิ้นงานและเพิ่มโหลดด้วยค่าความต้านทานต่ำ ๆ โดยให้ RL เป็นจุดอาร์คสตาร์ทเป็นตำแหน่งของลวดเชื่อมและชิ้นงานเหล็ก แรงดันเอาต์พุตจะตกลงมาที่เวลา 0.2 S และกระแสอาร์คสตาร์ทมีลักษณะเหมือนกระแสโอเวอร์ชูตพุ่งขึ้นไปแต่ในการจำลองนี้จะเห็นว่ากระแสจะพุ่งขึ้นไปไม่มากนัก และในรูปการจำลองที่ 4.4 เป็นผลการจำลองการทำงานแบบมีวงจรอาร์คสตาร์ทเข้าไปต่อร่วมการทำงานกับเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ของเครื่องเชื่อมจะเห็นว่าเมื่อใส่วงจรอาร์คสตาร์ทเข้าไปกราฟกระแสของจุดอาร์คสตาร์ทจะพุ่งขึ้นสูงมากมีลักษณะเหมือนโอเวอร์ชูตซึ่งลักษณะรูปสัญญาณเช่นนี้เป็นรูปสัญญาณที่ต้องการจากการจำลองการทำงานผ่านโปรแกรม



รูปที่ 4.3 ผลการจำลองผ่านโปรแกรม เส้นสีแดงคือ ( $V_{out}$ ) ส่วนสีน้ำเงินคือ ( $I_{arcstart}$ ) ของการอาร์คสตาร์ทแบบไม่มีวงจรอาร์คสตาร์ท

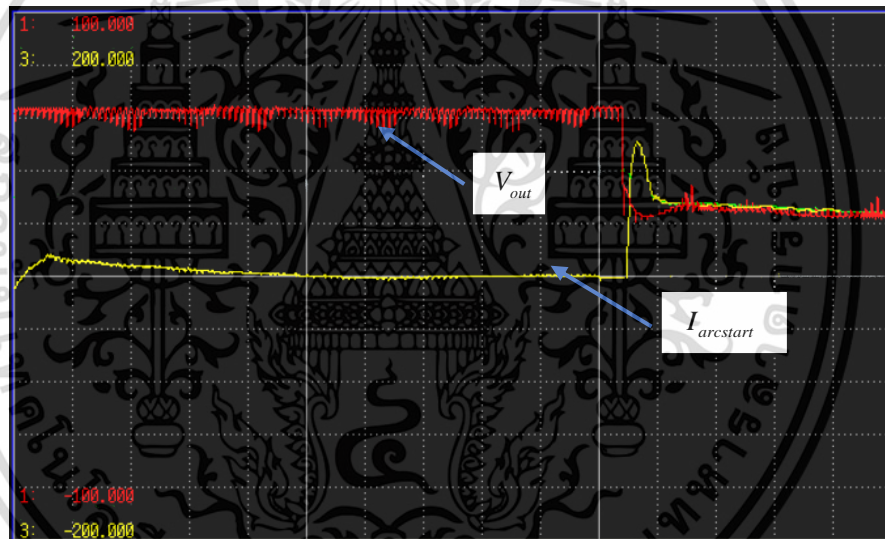


รูปที่ 4.4 ผลการจำลองผ่านโปรแกรม เส้นสีแดงคือ ( $V_{out}$ ) ส่วนสีน้ำเงินคือ ( $I_{arcstart}$ ) ของการอาร์คสตาร์ทแบบมีวงจรอาร์คสตาร์ท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 ผลการวัดสัญญาณรูปคลื่นจากเครื่องเชื่อมชนิดลวดแข็งตัน

จากรูปสัญญาณที่ 4.5 คือรูปสัญญาณแรงดันและกระแสที่วัดได้ทางเอาต์พุตของเครื่องเชื่อมชนิดลวดแข็งตันแบบไม่มีวงจรรีเลย์อาร์คสตาร์ทขณะเริ่มต้นเชื่อมที่กระแส 210 A , 21.0 V ขนาดความโตของลวดเชื่อมที่ 1.2 mm จะเห็นว่ากราฟเส้นสีแดง ( $V_{out}$ ) คือแรงดันโวลต์เตจของวงจรรีเลย์อาร์คสตาร์ทของเครื่องเชื่อมขณะเริ่มต้นทำงานและเส้นสีเหลือง ( $I_{arcstart}$ ) คือกระแสขณะเริ่มต้นเชื่อมแบบไม่มีวงจรรีเลย์อาร์คสตาร์ท เมื่อทำการกดสวิตช์เพื่อทำการเชื่อม  $V_{out}$  จะอยู่ที่ 65 โวลต์ หลังจากนั้นเมื่อลวดเชื่อมแตะลงบนชิ้นงานที่เป็นเหล็ก  $V_{out}$  จะตกลงมาตามที่ได้ตั้งค่าการเชื่อมไว้ที่เครื่องเชื่อม จะเห็นว่าแบบไม่มีวงจรรีเลย์อาร์คสตาร์ทกระแสขณะเริ่มต้นเชื่อมจะสูงไม่มากนักและลักษณะของกราฟจะพุ่งขึ้นแบบโอเวอร์ชูตในช่วงเวลาสั้นๆ เมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างผลการจำลองทางโปรแกรมกับผลการวัดสัญญาณทางเอาต์พุตของเครื่องเชื่อมนั้นมีความใกล้เคียงกันมาก โดยที่กระแสการเริ่มต้นเชื่อมแบบไม่มีวงจรรีเลย์อาร์คสตาร์ทของลวดเชื่อมขนาด 1.2 mm มีค่าอยู่ที่ 100 แอมป์ และเวลาของกระแสเริ่มต้นเชื่อมอยู่ที่ 1 ms



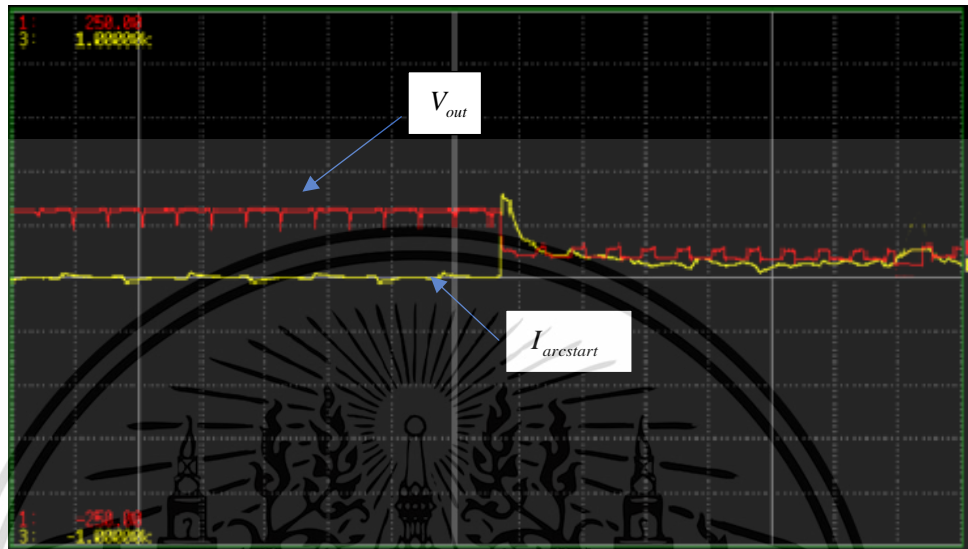
Volt/div= 20, Current/div=40 A/div, time/div=2 ms /div

รูปที่4.5 ผลการวัดสัญญาณที่จุดเอาต์พุตของเครื่องเชื่อมขณะเริ่มต้นเชื่อมที่ขนาดลวดเชื่อม 1.2 mm แบบไม่มีวงจรรีเลย์อาร์คสตาร์ท

จากรูปที่ 4.6 เป็นผลการวัดรูปคลื่นสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของเครื่องเชื่อม ( $V_{out}$ ) เส้นสีแดงเปรียบเทียบกับสัญญาณกราฟกระแสของจุดเริ่มต้นเชื่อมแบบที่มีวงจรรีเลย์อาร์คสตาร์ทบนเส้นสีเหลือง ( $I_{arcstart}$ ) ที่กระแสการเชื่อม 210 A, 21.0 V ที่ขนาดลวดเชื่อม 1.2 mm เช่นเดียวกันกับแบบไม่มีวงจรรีเลย์อาร์คสตาร์ท จะเห็นว่าเมื่อนำวงจรรีเลย์อาร์คสตาร์ทมาต่อร่วมกันกับเอาต์พุตของเครื่องเชื่อมชนิดลวดแข็งตัน เมื่อกดสวิตช์การทำงาน และพิจารณาที่กราฟกระแสจะเห็นว่าลักษณะกราฟของกระแสอาร์คสตาร์ทจะพุ่งสูงมากกว่าแบบไม่มีวงจรรีเลย์อาร์คสตาร์ท โดยที่กระแสอาร์คสตาร์ทมีค่าอยู่ประมาณ 300 A และมีเวลาอยู่ที่ประมาณ 5 ms

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

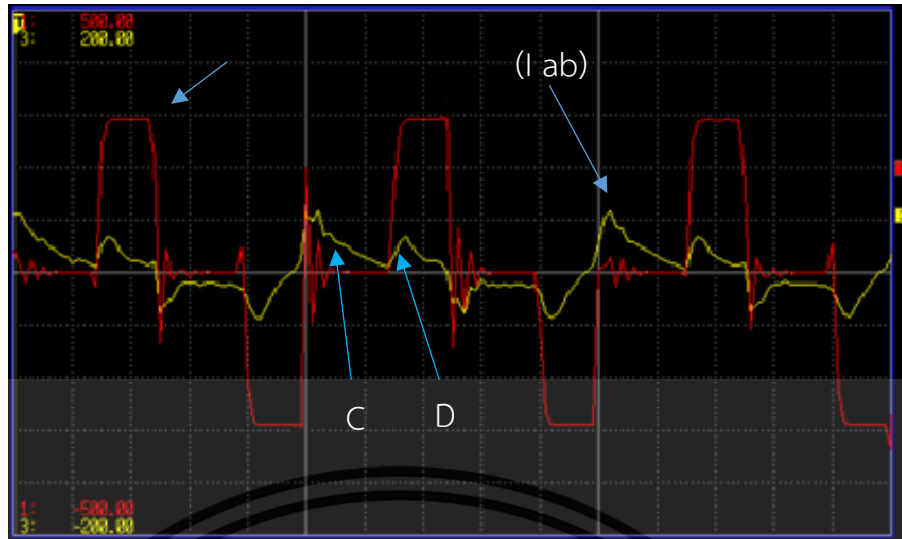
ดังนั้นจะเห็นว่าเมื่อนำวงจรอาร์คสตาร์ทมาต่อรวมกันกับเอาต์พุตของเครื่องเชื่อมแล้วทำงานร่วมกันขณะเริ่มต้นเชื่อม กราฟของกระแสจะมากกว่าแบบไม่มีวงจรอาร์คสตาร์ท และเวลาของการอาร์คสตาร์ทก็จะมากกว่าด้วย ซึ่งกระแสที่ได้จากวงจรอาร์คสตาร์ทนั้นก็ไปอุ่นชิ้นงาน (Pre-Heat) ให้กับจุดเริ่มต้นเชื่อมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้มีการเชื่อมที่ดียิ่งขึ้น ณ จุดเริ่มต้นเชื่อม



Volt/div= 50, Current/div=200 A/div, time/div=10 ms/div

รูปที่ 4.6 ผลการวัดสัญญาณที่จุดเอาต์พุตของเครื่องเชื่อมขณะเริ่มต้นเชื่อมที่ขนาดลวดเชื่อม 1.2 mm แบบมีวงจรอาร์คสตาร์ท

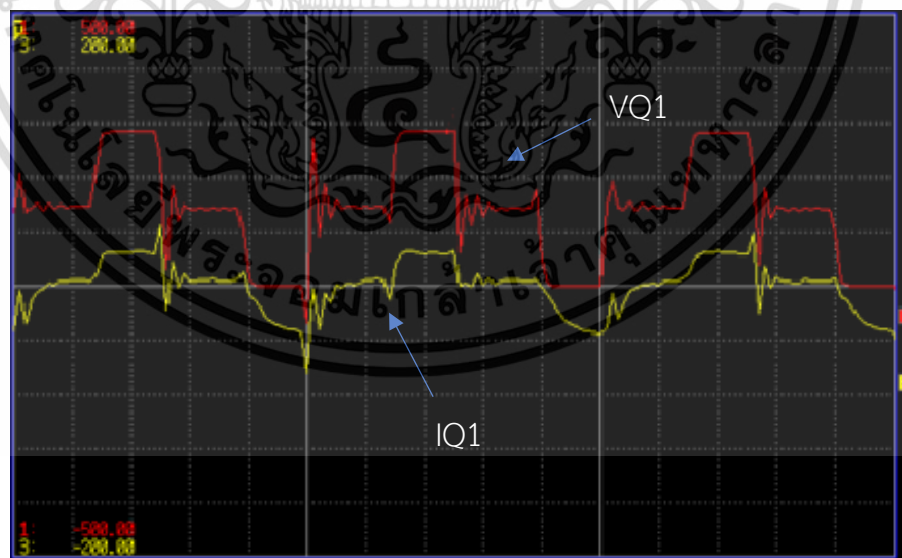
ในรูปที่ 4.7 นั้นเป็นรูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่จุด A และ B ของวงจรอินเวอร์เตอร์ ขณะวงจรทำการเชื่อมที่ตำแหน่ง C และอาร์คขึ้นงานที่ตำแหน่ง D หรือเป็นการวัดสัญญาณแรงดันรูปคลื่นตกค่อมขดลวดหม้อแปลงอินเวอร์เตอร์ฝั่งปฐมภูมิของเครื่องเชื่อมขณะเชื่อมชิ้นงานที่กระแส 210 A 21.0 V โดยกราฟเส้นสีแดงคือแรงดันตกคร่อมจุด A และ B ของหม้อแปลง และกราฟเส้นสีเหลืองคือกระแสที่ไหลผ่านหม้อแปลงขณะทำการเชื่อมเพื่อเป็นการศึกษาวิจัยและวิเคราะห์รูปคลื่นสัญญาณขณะวงจรอินเวอร์เตอร์ของเครื่องเชื่อมทำงานร่วมกับวงจรอาร์คสตาร์ท



Volt/div= 100, Current/div=50 A/div, time/div=20 us/div

รูปที่ 4.7 ผลการวัดสัญญาณกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่จุด A และจุด B ของเครื่องเชื่อมขณะเชื่อมชิ้นงาน

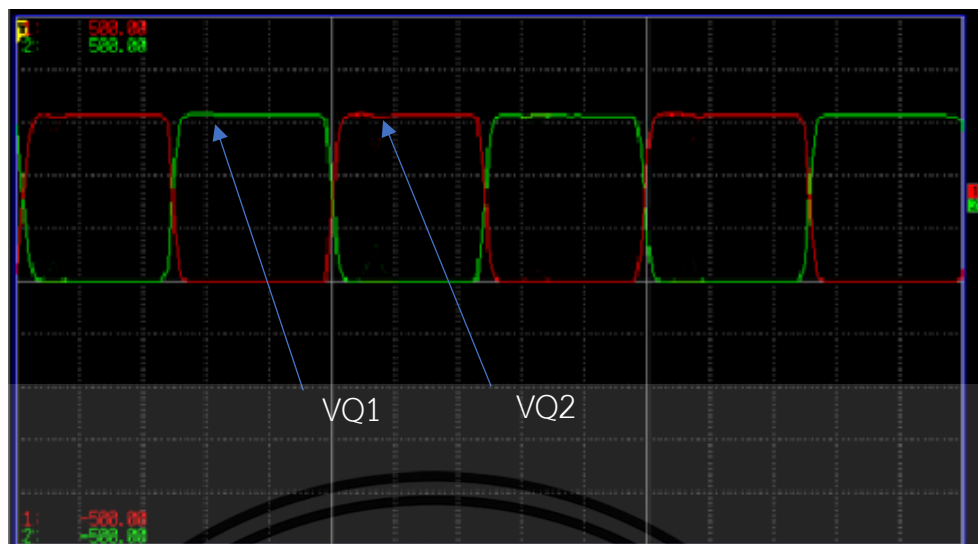
ในรูปที่ 4.8 นั้นเป็นรูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ไหลผ่าน IGBT ที่จุด Q1 ของวงจรอินเวอร์เตอร์ของเครื่องเชื่อมขณะเชื่อมชิ้นงานที่กระแส 120 A 21.0 V โดยที่กราฟเส้นสีแดงคือแรงดันที่ตกคร่อม IGBT ตำแหน่งที่ Q1 และกราฟเส้นสีเหลืองคือกระแสที่ไหลผ่าน IGBT ที่ตำแหน่ง Q1 เช่นกัน การวัดสัญญาณที่จุดนี้ก็เพื่อเป็นการศึกษาและวิเคราะห์รูปคลื่นสัญญาณที่จุด Q1 ขณะวงจรอินเวอร์เตอร์ของเครื่องเชื่อมทำงานร่วมกับวงจรอาร์คสตาร์ท



Volt/div= 100, Current/div=50 A/div, time/div=20 us/div

รูปที่ 4.8 ผลการวัดสัญญาณกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ไหลผ่าน IGBT ที่จุด Q1 ของเครื่องเชื่อมขณะเชื่อมชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Volt/div= 100, time/div=20 us/div

รูปที่ 4.9 ผลการวัดสัญญาณแรงดันรูปคลื่นไฟฟ้าตกคร่อม IGBT ที่จุด Q1 และ Q2 เปรียบเทียบกัน ขณะไม่มีโหลด

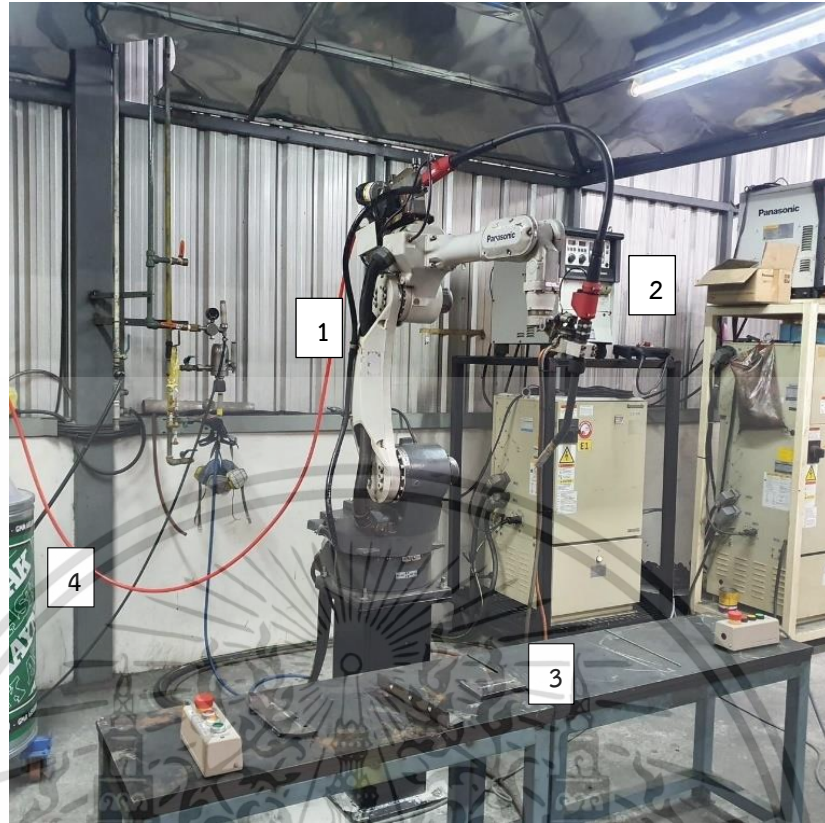
ในรูปที่ 4.9 นั้นเป็นรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม IGBT ที่ตำแหน่ง Q1 กราฟเส้นสีเขียวและ Q2 กราฟเส้นสีแดง ของวงจรอินเวอร์เตอร์ของเครื่องเชื่อมขณะไม่มีโหลดเปรียบเทียบกับกัน เพื่อเป็นการศึกษาและวิเคราะห์รูปคลื่นสัญญาณ ขณะวงจรทำงานร่วมกับวงจรอาร์คสตาร์ท

#### 4.2.3 ผลการเชื่อมชิ้นงานบนแผ่นเหล็ก

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงผลการเชื่อมชิ้นงานที่เป็นเหล็ก ณ จุดเริ่มต้นเชื่อม โดยเป็นการเชื่อมบนชิ้นงานเหล็กความหนาขนาด 3.2 mm โดยเหตุผลที่เลือกเชื่อมเหล็กบนความหนาขนาด 3.2 mm เพราะว่าเหล็กที่มีความหนาขนาด 3.2 mm ขึ้นไปเมื่อโดนความร้อนจะไม่บิดตัวและงอ และสามารถตรวจสอบความซึ่มลึกได้ง่าย โดยเชื่อมบนลวดเชื่อมขนาด 1.0 mm และ 1.2 mm อย่างละหนึ่งชิ้นเชื่อมสองแนวขนานกันบนเหล็กแผ่นเดียวกันที่กระแสเชื่อม 210 แอมป์ 21 โวลต์ โดยเชื่อมให้เป็นแนวยาวแบบเส้นตรงยาวประมาณ 10 เซนติเมตรทั้งสองแนวเท่า ๆ กันโดยที่แนวเชื่อมบนเป็นแนวเชื่อมแรกในการทดลองเชื่อมแบบไม่มีวงจรอาร์คสตาร์ท หลังจากเชื่อมแนวแรกเสร็จรอให้ชิ้นงานเหล็กเย็นตัวก่อนจากนั้นทำการเชื่อมแนวที่สองแบบมีวงจรอาร์คสตาร์ท

โดยที่การเชื่อมชิ้นงานนั้นจะใช้โรบอทในการเชื่อมชิ้นงาน โดยดังแสดงในรูปที่ 4.10 เพราะว่าโรบอทนั้นจะให้การเชื่อมที่มีความเที่ยงตรงกว่าการเชื่อมด้วยมือเปล่า เพราะเชื่อมด้วยมือเปล่านั้น มือคนเราจะมีการแกว่งและความเร็วในการเชื่อมไม่คงที่แนวเชื่อมอาจจะไม่ตรงและไม่สวยงาม แต่ถ้าป็นโรบอทแล้วแนวเชื่อมที่ได้นั้นจะตรงและแนวเชื่อมจะสม่ำเสมอจนตลอดทั้งแนวเชื่อม และการเก็บข้อมูลต่างๆก็จะมีคามเที่ยงตรงด้วย

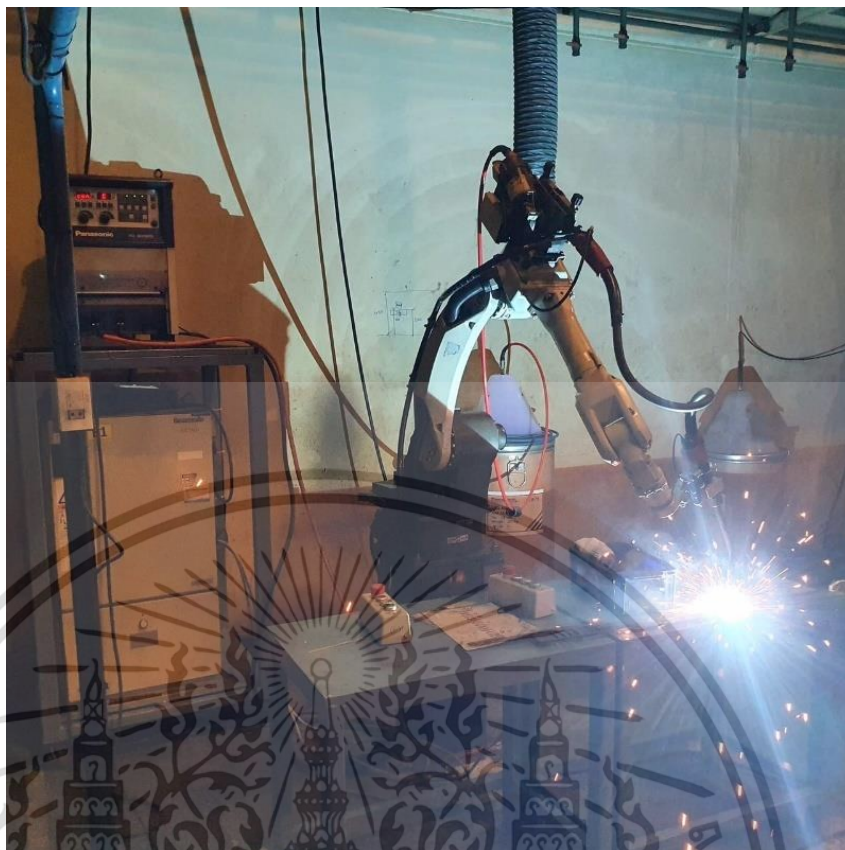
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมชิ้นงานในการวิจัย

- โดยที่หมายเลข 1). โรบอทที่ใช้ในการเชื่อม  
 2). เครื่องเชื่อมที่ใช้ในงานวิจัย  
 3). ชั้นงานที่ใช้ในงานเชื่อม  
 4). ลวดเชื่อมชนิดแข็งตันที่ใช้ในการเชื่อม

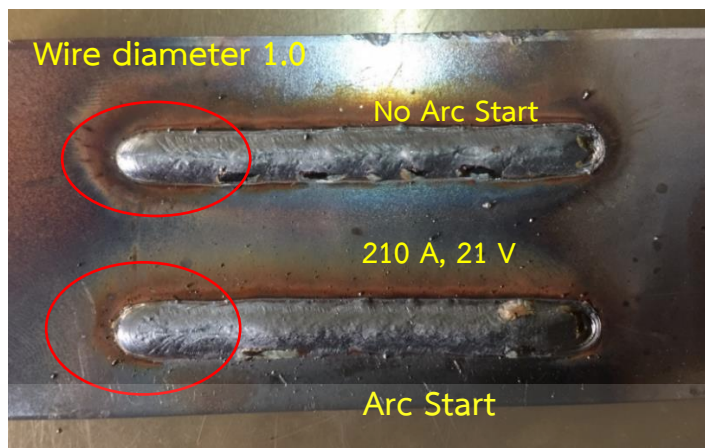
จากรูปที่ 4.11 เป็นลักษณะของโรบอทที่กำลังเชื่อมชิ้นงานที่ทำการวิจัย จะเห็นได้ว่าลักษณะการเชื่อมชิ้นงานโดยโรบอทจะมีความคงที่มากกว่าทั้งในเรื่องความเร็วที่คงที่ ระยะของแนวเชื่อมที่เท่ากัน และไม่มีการบิดเบี้ยวของแนวเชื่อม แนวเชื่อมจะมีความตรงตลอดทั้งแนว โดยที่แนวเชื่อมที่เชื่อมเสร็จแล้วนั้นดูได้จากรูปที่ 4.12 โดยที่รูป (ก) เป็นการเชื่อมที่ลวดขนาด 1.0 mm. และรูปที่ 4.12 (ข) เป็นการเชื่อมที่ลวดเชื่อมขนาด 1.2 mm.



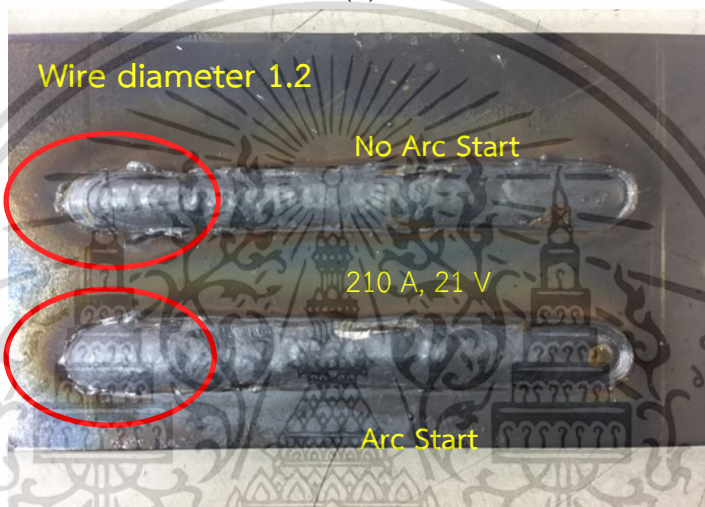
รูปที่ 4.11 การทดสอบการเชื่อมชิ้นงานจะใช้โรบอทในการเชื่อม

ในรูปที่ 4.12 (ก) จะเห็นได้ว่าแนวเชื่อมบนเป็นแนวเชื่อมแบบไม่มีวงจรรอาร์คสตาร์ทที่ลวดเชื่อมขนาด 1.0 mm นั้นจุดเริ่มต้นเชื่อมจะเล็กกว่าแนวเชื่อมล่างที่มีวงจรรอาร์คสตาร์ทอย่างเห็นได้ชัด รวมถึงสะเก็ดไฟขณะเชื่อมชิ้นงานก็น้อยกว่าด้วย เช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.12 (ข) เป็นการเชื่อมที่ลวดเชื่อมขนาด 1.2 mm สังกะสีที่วงกลมสีแดงที่เป็นจุดเริ่มต้นเชื่อม แนวเชื่อมบนเป็นแบบไม่มีวงจรรอาร์คสตาร์ทลักษณะของจุดเริ่มต้นเชื่อมนั้นจะเล็กกว่าแนวเชื่อมล่างซึ่งเป็นแบบมีวงจรรอาร์คสตาร์ทนั้นอย่างชัดเจนเหมือนกันกับการเชื่อมที่ใช้ลวดเชื่อมขนาด 1.0 mm เช่นเดียวกัน รวมถึงการที่มีวงจรรอาร์คสตาร์ทนั้นยังช่วยลดการติดของสะเก็ดไฟบนชิ้นงานได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

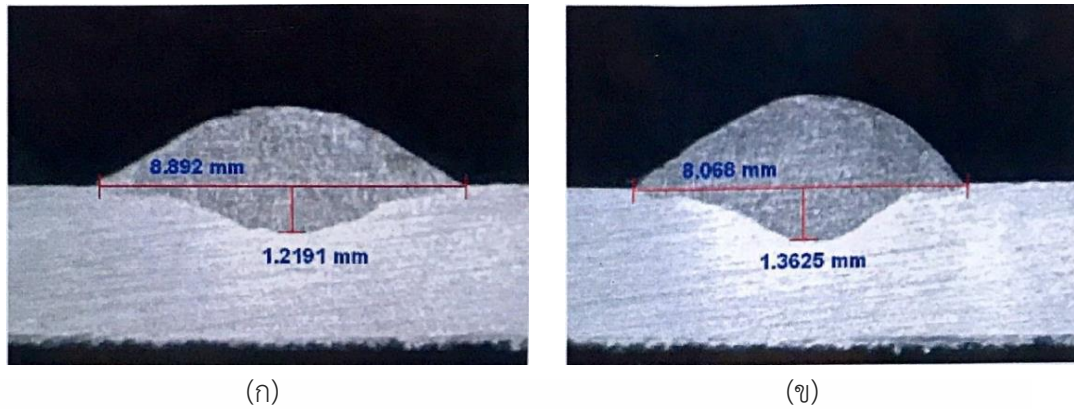


(ข)

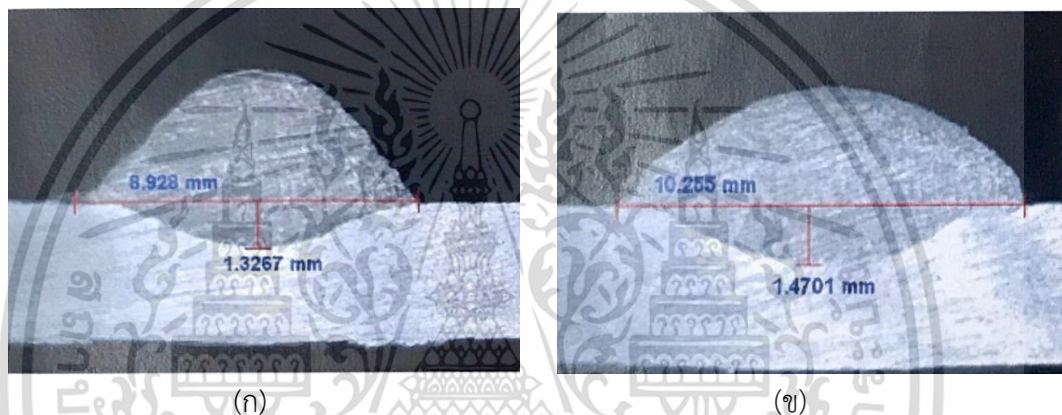
รูปที่ 4.12 ผลการเชื่อมบนชิ้นงานแบบไม่มีวงจรรออาร์คสตาร์ทและแบบมีวงจรรออาร์คสตาร์ท  
(ก) ลวดเชื่อมขนาด 1.0 mm (ข) ลวดเชื่อมขนาด 1.2 mm

#### 4.2.4 การตรวจสอบความซึมลึกของชิ้นงาน

ในส่วนนี้จะแสดงผลของการตรวจสอบความซึมลึกของชิ้นงานที่ได้เชื่อมเสร็จแล้วมาเปรียบเทียบกับกันทั้งสองแบบ โดยการตัดชิ้นงานที่เชื่อมบริเวณจุดอาร์คสตาร์ทเข้าไปประมาณ 1 เซนติเมตรทั้งสองแนวเท่า ๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (ก) และ (ข) จากนั้นนำชิ้นงานไปเข้ากระบวนการตรวจหาความซึมลึกโดยใช้น้ำยาทางเคมีที่เรียกว่า Penetration Testing โดยฉีคน้ำยาเข้าไปตรงรอยตัดของแนวเชื่อม เพื่อให้แนวซึมลึกไหลขึ้นมา หลังจากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการส่องกล้องหาความลึกโดยกล้องตรวจสอบความซึมลึกของชิ้นงาน



รูปที่ 4.13 ผลการตรวจสอบความซึมลึกชิ้นงาน (ก)แบบไม่มีวงจรรีอาร์คสตาร์ทและ (ข)แบบมีวงจรรีอาร์คสตาร์ท บนลวดเชื่อมขนาด 1.0 mm



รูปที่ 4.14 ผลการตรวจสอบความซึมลึกชิ้นงาน (ก)แบบไม่มีวงจรรีอาร์คสตาร์ทและ (ข)แบบมีวงจรรีอาร์คสตาร์ท บนลวดเชื่อมขนาด 1.2 mm

จากรูปที่ 4.13 เป็นผลการเชื่อมชิ้นงานบนลวดเชื่อมขนาด 1.0 mm จะเห็นว่ารูป (ก) ไม่มีวงจรรีอาร์คสตาร์ทระยะแนวซึมลึกจากพื้นผิวเหล็กลงไปเท่ากับ 1.2191 mm ความกว้างของแนวเชื่อมเท่ากับ 8.292 mm และรูป (ข) ผลการเชื่อมที่ลวดขนาด 1.0 mm เช่นกันมีวงจรรีอาร์คสตาร์ทซึ่งมีระยะความซึมลึกจากพื้นผิวเหล็กลงไปเท่ากับ 1.3625 mm ความกว้างของแนวเชื่อมเท่ากับ 8.068 mm ที่กระแสเชื่อม 210A, 21.0V เท่ากัน

รูปที่ 4.14 เป็นผลการเชื่อมชิ้นงานบนลวดเชื่อมขนาด 1.2 mm จะเห็นว่ารูป (ก) ไม่มีวงจรรีอาร์คสตาร์ทระยะแนวซึมลึกจากพื้นผิวเหล็กลงไปเท่ากับ 1.3267 mm ความกว้างของแนวเชื่อมเท่ากับ 8.928 mm และรูป (ข) ผลการเชื่อมที่ลวดขนาด 1.2 mm เช่นกันมีวงจรรีอาร์คสตาร์ทซึ่งมีระยะความซึมลึกจากพื้นผิวเหล็กลงไปเท่ากับ 1.4701 mm ความกว้างของแนวเชื่อมเท่ากับ 10.255 mm ที่กระแสเชื่อม 210A, 21.0V เท่ากัน ดังนั้นจะเห็นว่าเมื่อต่อวงจรรีอาร์คสตาร์ทเข้าไปทำงานร่วมกับเอาต์พุทของวงจรอินเวอร์เตอร์ของเครื่องเชื่อม เมื่อทำการเชื่อมและตรวจสอบความซึมลึกแล้วบริเวณจุดเริ่มต้นเชื่อมมีความซึมลึกมากกว่าไม่มีวงจรรีอาร์คสตาร์ท

ตารางที่ 4.1 ผลการเชื่อมบนลวดเชื่อมที่ขนาดต่างกันแบบมีอาร์คสตาร์ทและไม่มีอาร์คสตาร์ท

ขนาด ลวด กระแสเชื่อม	ขนาดลวดเชื่อม 1.0 mm		ขนาดลวดเชื่อม 1.2 mm	
	ไม่มีอาร์คสตาร์ท	มีอาร์คสตาร์ท	ไม่มีอาร์คสตาร์ท	มีอาร์คสตาร์ท
210 A, 21.0 V	1.2191mm	1.3625 mm	1.3257 mm	1.4701 mm

และจากรูปที่ 4.12 บนการเชื่อมที่ลวดเชื่อมขนาด 1.2 mm จะเห็นว่ารูปร่าง (ก) ไม่มีวงจรรอาร์คสตาร์ทระยะแนวซิมลิกจากพื้นผิวเหล็กเท่ากับ 1.3627 mm จะน้อยกว่ารูป (ข) ที่มีวงจรรอาร์คสตาร์ทซึ่งมีระยะความซิมลิกจากพื้นผิวเหล็กเท่ากับ 1.4701 mm ที่กระแสเชื่อม 210A, 21.0V เท่ากัน

และจากตารางที่ 4.2 [10] เป็นผลการวิจัยเรื่องหนึ่งที่วิจัยความซิมลิกของการเชื่อมโลหะที่ 210 A , 20.8271 V และต้องการความซิมลิกที่ 1.1 mm จากตารางที่ 4.2 นั้นเป็นเป้าหมายของการวิจัย โดยผลการศึกษานี้คือ ระยะซิมลิกของ รอยเชื่อม ภายใต้มาตรฐานของโรงงานผลิตรถยนต์แห่งหนึ่งคือต้องมีระยะซิมลิกไม่น้อยกว่า 1.0 mm โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบนเคน (Box-Behnken) และฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability function) เพื่อหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุมสำหรับปัจจัยที่ทำการศึกษามี 5 ปัจจัย ได้แก่ กระแสไฟฟ้าเชื่อม แรงดันไฟฟ้าเชื่อม มุมของหัวเชื่อม ช่องว่างระหว่างชิ้นงานเชื่อม และ อัตราการไหลของแก๊สคลุม ซึ่งผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญและค่าระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้ระยะซิมลิกสูงสุดคือกระแสไฟฟ้าเชื่อมเท่ากับ 210 A แรงดันไฟฟ้าเชื่อมเท่ากับ 20.8 V มุมของหัวเชื่อมเท่ากับ 62 degree โดยได้ค่าเฉลี่ยของระยะซิมลิก เท่ากับ 1.1 mm ซึ่งผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานที่ต้องการ

ตารางที่ 4.2 เป้าหมายเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับความลึกของการเจาะของรอยเชื่อม[10]

Response Optimization						
Parameters						
	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
Penetration	Target	1.0	1.1	1.2	1	1
Global Solution						
Ampere (A)	=	210				
Voltage (B)	=	20.8271				
Angle (C)	=	62.0062				
Predicted Responses						
Penetration = 1.1 , desirability = 1.000000						
Composite Desirability = 1.000000						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 [10] เป็นผลการทดลองเพื่อยืนยันผล 5 ครั้งได้ระยะซึมลึกของรอยเชื่อมโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.1 mm ซึ่งเท่ากับค่าที่ได้จากการทำนายในตารางที่ 4.2 และเมื่อเทียบกับค่าตามมาตรฐานของลูกค้ำ คือ 1.00 mm พบว่าค่าที่ได้จากการทดลองยืนยันผลผ่านมาตรฐานของลูกค้ำ นอกจากนี้ยังได้ทำการตรวจสอบลักษณะอื่นๆของรอยเชื่อมได้แก่ความสูงและความกว้างของรอยเชื่อมพบว่าผ่านมาตรฐานของลูกค้ำเช่นเดียวกันซึ่งมาตรฐานของโรงงานผลิตรถยนต์ที่เป็นลูกค้ำกำหนดไว้ว่าความสูงของรอยเชื่อมต้องไม่น้อยกว่า 1.05 mm และความกว้างต้องไม่น้อยกว่า 1.20 mm และจากตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าช่วงความเชื่อมั่น 95% ของผลการทดลองยืนยันผลผ่านมาตรฐานของลูกค้ำทั้งหมดเป็นการเพิ่มความ เชื่อมั่นของการเชื่อมด้วยค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่หาได้

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบยืนยันตามเงื่อนไขการเชื่อมที่เหมาะสมที่สุด[10]

Run No	Penetration depth (mm)	Bead height (mm)	Bead width (mm)
1	1.13	2.19	5.95
2	1.03	2.19	6.28
3	1.06	2.22	6.46
4	1.19	2.17	6.51
5	1.08	2.03	6.22
Average	1.10	2.16	6.28
95%CI	1.02-1.18	2.07-2.25	6.01-6.56

ดังนั้นจะเห็นว่าเมื่อนำตารางที่ 4.1 คือผลการเชื่อมบนลวดเชื่อมที่ขนาดต่างกันแบบมีอาร์คสตาร์ท และไม่มีอาร์คสตาร์ท กับตารางที่ 4.3 มาเปรียบเทียบมาตรฐานความซึมลึกกันจะเห็นว่าตารางที่ 4.1 ก็ผ่านเกณฑ์มาตรฐานความซึมลึกเช่นกันตามที่ได้อ้างอิงตามงานวิจัยข้างต้น ฉะนั้นแล้วการมีวงจรรีอาร์คสตาร์ทนั้นก็ช่วยในการซึมลึก ณ จุดเริ่มต้นเชื่อมได้ดีเช่นกัน

#### 4.2.5 ผลของอุณหภูมิตรงตำแหน่งจุดอาร์คสตาร์ท

ในส่วนนี้เป็นการวัดค่าความร้อนตรงตำแหน่งบริเวณจุดอาร์คสตาร์ทของแนวเชื่อมเพื่อดูว่าระหว่างมีวงจรรีอาร์คสตาร์ทกับไม่มีวงจรรีอาร์คสตาร์ทนั้นค่าความร้อนมีความแตกต่างกันเพียงใด ซึ่งการทดลองนี้เป็นการวัดความร้อนตรงตำแหน่งอาร์คสตาร์ทเท่านั้นไม่ได้วัดความร้อนตรงกลางแนวเชื่อมแต่อย่างใด โดยการทดลองนั้นจะนำป็นยิงความร้อนชนิดที่เป็นอินฟราเรดไปยังบริเวณจุดอาร์คสตาร์ทโดยมีระยะห่างระหว่างปืนยิงความร้อนกับจุดอาร์คสตาร์ทอยู่ที่ระยะสองฟุต โดยแช่ที่จุดตรวจจับที่ระยะเวลาเวลาสองวินาทีในการตรวจจับ และทดลองการตรวจจับแบบละห้าครั้งแบบมีวงจรรีอาร์คสตาร์ทห้าครั้งและแบบไม่มีวงจรรีอาร์คสตาร์ทห้าครั้งและนำผลที่ได้มาเฉลี่ยค่าที่ได้ลงในตาราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

**รูปที่ 4.15** ผลของการวัดอุณหภูมิโดยใช้ปืนยิงความร้อนแบบอินฟราเรด (ก) ผลอุณหภูมิของจุดอาร์คสตาร์ทแบบไม่มีวงจรรีเซ็ต (ข) ผลอุณหภูมิของจุดอาร์คสตาร์ทแบบมีวงจรรีเซ็ต

จากรูปที่ 4.15 เป็นรูปผลการใช้ปืนยิงความร้อนแบบอินฟราเรดวัดอุณหภูมิความร้อนบริเวณจุดอาร์คสตาร์ท ในรูป (ก) เป็นค่าที่วัดได้จากจุดอาร์คสตาร์ทแบบไม่มีวงจรรีเซ็ต ส่วนรูป (ข) เป็นค่าที่วัดได้จากจุดอาร์คสตาร์ทแบบมีวงจรรีเซ็ต จะเห็นว่าเมื่อนำมาเปรียบเทียบกันแล้วรูป ข แบบมีวงจรรีเซ็ตนั้นให้ค่าความร้อน ณ จุดอาร์คสตาร์ทมากกว่าแบบไม่มีวงจรรีเซ็ตอย่างเห็นได้ชัด เมื่อนำค่าที่ได้จากการวัดอุณหภูมิความร้อนทั้งหมดมาใส่ในตารางเพื่อหาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิความร้อนในแต่ละแบบจะเห็นว่าอุณหภูมิความร้อน ณ จุดอาร์คสตาร์ทแบบไม่มีวงจรรีเซ็ตจะมีค่าเฉลี่ยความร้อนอยู่ที่ 105.7 องศาเซลเซียส และแบบมีวงจรรีเซ็ตนั้นจะมีค่าเฉลี่ยความร้อน ณ จุดเริ่มต้นอาร์คสตาร์ทอยู่ที่ 171.4 องศาเซลเซียส ดังนั้นเมื่อพิจารณาที่ค่าเฉลี่ยจะเห็นว่าแบบมีวงจรรีเซ็ตนั้นให้ค่าความร้อนมากกว่าแบบไม่มีวงจรรีเซ็ตอย่างชัดเจน

**ตารางที่ 4.4** ผลการทดสอบหาค่าเฉลี่ยความร้อน ณ จุดอาร์คสตาร์ท

ครั้งที่	แบบไม่มีวงจรรีเซ็ต	แบบมีวงจรรีเซ็ต
1	105.1 °C	175.7 °C
2	101.8 °C	169.6 °C
3	110.3 °C	163.3 °C
4	108.8 °C	176.9 °C
5	103.4 °C	171.5 °C
ค่าเฉลี่ย	105.7 °C	171.4 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

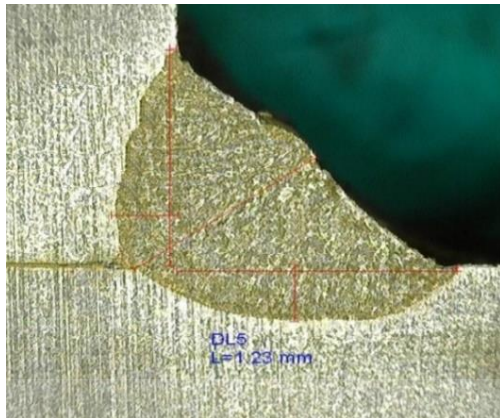
#### 4.2.6 ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุตรงตำแหน่งวงจรรออาร์คสตาร์ท

ในส่วนผลการทดลองนี้จะเป็นการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุในวงจรรออาร์คสตาร์ทโดยจะเป็นการลดค่าตัวเก็บประจุในวงจรรออาร์คสตาร์ทลงจากเดิม 4,700  $\mu\text{F}$  จะทำการทดลองลดค่าตัวเก็บประจุลงสามค่าโดยใช้ค่ามาตรฐานของตัวเก็บประจุที่มีอยู่คือ 3,300  $\mu\text{F}$  , 2,200  $\mu\text{F}$  และ 1,000  $\mu\text{F}$  ในการทดลอง ซึ่งดูได้จากรูปที่ 4.16 จากนั้นทดลองโดยการเชื่อมชิ้นงานเช่นเดิมและมีการตัดเช็คตรวจสอบความชื้นลึกลับของชิ้นงานบริเวณจุดอาร์คสตาร์ทเช่นเดิมว่ามีความแตกต่างจากค่าตัวเก็บประจุเดิมที่ใช้ในการทดลองแรกอย่างไร โดยใช้กระแสในการเชื่อม 210 A, 21.0 V ใช้ลวดแข็งต้นในการเชื่อมที่ขนาด 1.2 mm และแก๊ส  $\text{CO}_2$  ในการทดลองเหมือนกันกับการทดลองหลัก

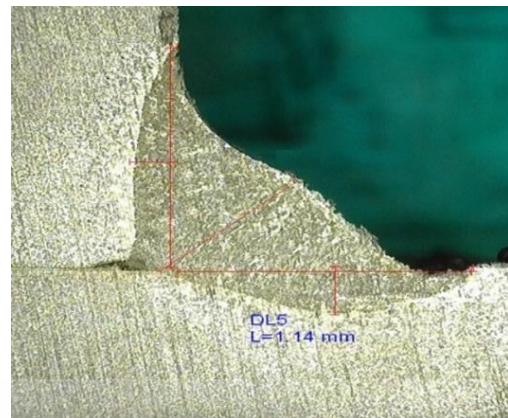


รูปที่ 4.16 ตัวเก็บประจุสามค่าที่นำมาใช้ในการทดลอง

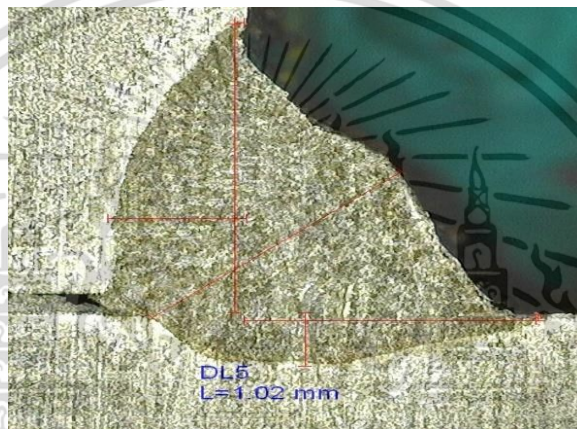
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

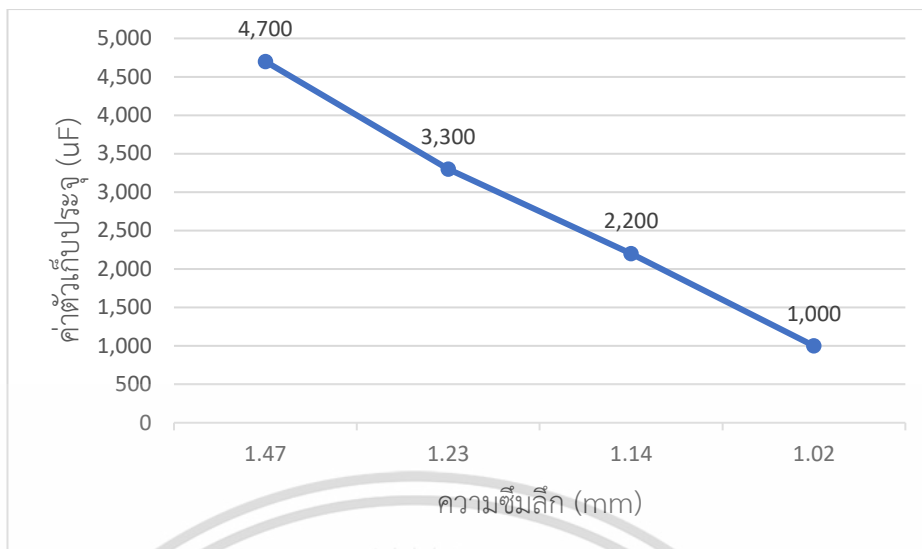


(ค)

**รูปที่ 4.17** ผลของการตัดเช็คตรวจสอบความชื้นลิกของชิ้นงานเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุ ณ จุดอาร์คสตาร์ทของแนวเชื่อม

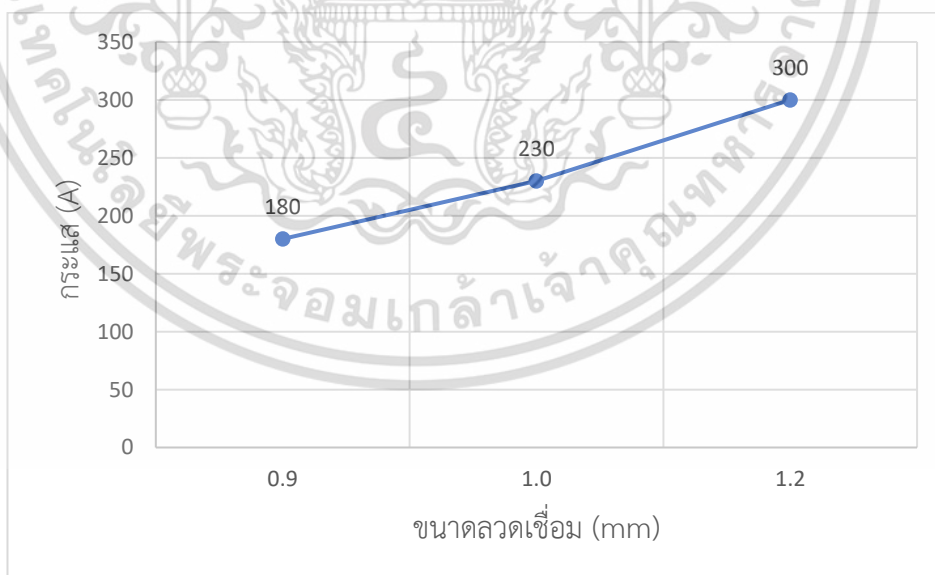
จากรูปที่ 4.17 เป็นผลการตัดเช็คความชื้นลิกของชิ้นงานสามชิ้น ณ จุดอาร์คสตาร์ทเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุของตัวเก็บประจุโดยรูป ก เป็นผลการตัดเช็คชิ้นงานเมื่อเปลี่ยนค่าความจุของตัวเก็บประจุเป็น 3,300  $\mu\text{F}$  จะเห็นว่าหลังจากตัดเช็คตรวจสอบความชื้นลิกค่าที่ได้เท่ากับ 1.23 mm รูป ข เป็นผลการตัดเช็คชิ้นงานเมื่อเปลี่ยนค่าความจุของตัวเก็บประจุเป็น 2,200  $\mu\text{F}$  จะเห็นว่าหลังจากตัดเช็คตรวจสอบความชื้นลิกค่าที่ได้เท่ากับ 1.14 mm และรูป ค เป็นผลการตัดเช็คชิ้นงานเมื่อเปลี่ยนค่าความจุของตัวเก็บประจุเป็น 1,000  $\mu\text{F}$  จะเห็นว่าหลังจากตัดเช็คตรวจสอบความชื้นลิกค่าที่ได้เท่ากับ 1.02 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงค่าความชื้นลึกของชิ้นงานที่จุดอาร์คสตาร์ทเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุ

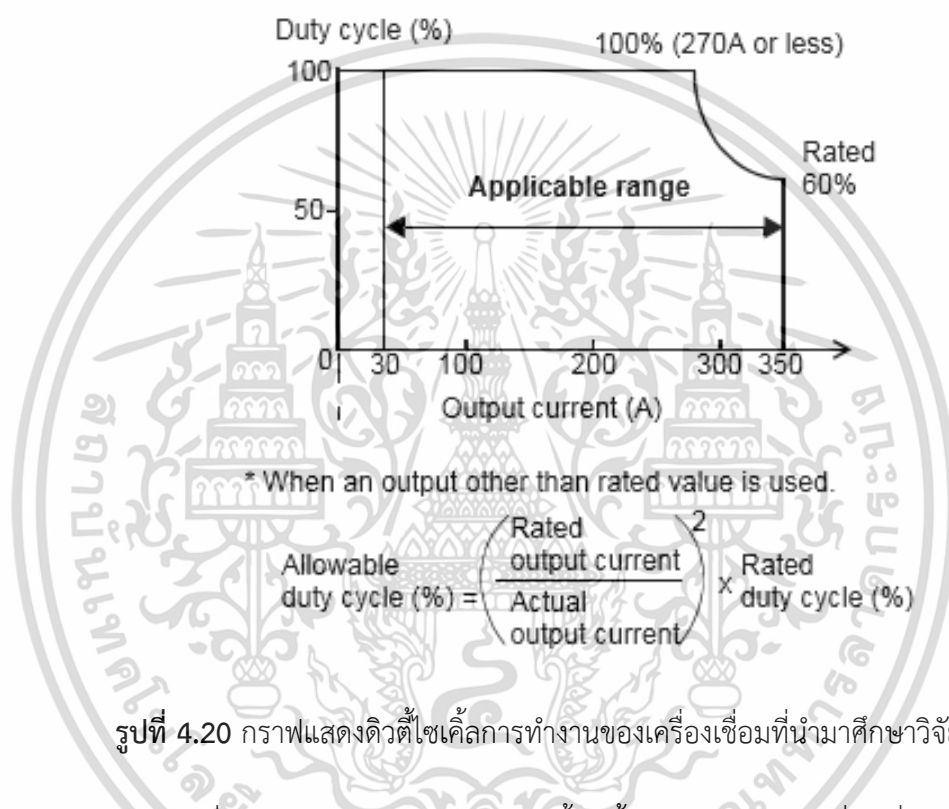
จากรูปที่ 4.18 เป็นกราฟแสดงค่าความชื้นลึกของชิ้นงานที่จุดอาร์คสตาร์ทเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุ เมื่อพิจารณาจากการพล็อตจะเห็นว่าจากค่าตัวเก็บประจุเดิมในการทดลองที่ค่า 4,700 uF เมื่อมีการลดค่าตัวเก็บประจุลงมาเป็น 3,300 uF , 2,200 uF และ 1,000 uF ตามลำดับและทำการตัดเช็คตรวจสอบความชื้นลึกของชิ้นงานโลหะจะเห็นว่าค่าความชื้นลึกของชิ้นงาน ณ จุดอาร์คสตาร์ทมีค่าลดลง ฉะนั้นแล้วจึงสรุปได้ว่าผลของค่าตัวเก็บประจุก็มีผลในความชื้นลึกของจุดอาร์คสตาร์ทในแนวเชื่อมเช่นกัน



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงกระแสอาร์คสตาร์ทแต่ละขนาดของลวดเชื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปกราฟที่ 4.19 แสดงกระแสจุดอาร์คสตาร์ทของลวดแต่ละขนาด จะเห็นว่าเมื่อเปลี่ยนขนาดของลวดเชื่อมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน กระแสอาร์คสตาร์ทก็จะต่างกันด้วย โดยที่ถ้าเปลี่ยนเป็นลวดเชื่อมแข็งต้นขนาด 1.2 mm กระแสอาร์คสตาร์ทจะอยู่ที่ 300 A ถ้าเปลี่ยนเป็นลวดเชื่อมแข็งต้นขนาด 1.0 mm กระแสอาร์คสตาร์ทจะอยู่ที่ 230 A และถ้าเปลี่ยนเป็นลวดเชื่อมขนาด 0.9mm กระแสอาร์คสตาร์ทจะอยู่ที่ 180 A ฉะนั้นจะเห็นว่ากระแสอาร์คสตาร์ทขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงขนาดของลวดเชื่อม ที่นำมาเชื่อมชิ้นงาน เพราะลวดเชื่อมที่ใหญ่ขึ้น ความต้านทานก็จะน้อยลง การใช้กระแสอาร์คสตาร์ทก็ต้องมากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงตัวชี้วัดชิ้นการทำงานของเครื่องเชื่อมที่นำมาศึกษาวิจัย [11]

จากรูปกราฟที่ 4.20 [11] เป็นกราฟแสดงตัวชี้วัดชิ้นการทำงานของเครื่องเชื่อมชนิดลวดแข็งต้นที่นำมาวิจัยและศึกษา จะเห็นว่าถ้าเครื่องเชื่อมที่กระแส 270 A หรือน้อยกว่า เครื่องจะทำงานได้ 100 % โดยไม่ต้องหยุดพักเครื่อง แต่ถ้าเชื่อมที่กระแสสูงสุดของเครื่องเชื่อมที่ 350 A เครื่องเชื่อมจะเชื่อมได้ 60 % คือเชื่อมได้ 6 นาที และต้องพัก 4 นาที หลังจากนั้นถึงจะเชื่อมได้ต่อ

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาวงจรอาร์คสตาร์ทต้นแบบสำหรับเครื่องเชื่อมชนิดลวดแข็งต้นจากการใช้โปรแกรมการทดลองวงจรอาร์คสตาร์ทต้นแบบจะเห็นว่าสิ่งที่เราต้องการจากวงจร คือ กระแส โอเวอร์ชูตที่ได้จากการคายประจุของคาปาซิเตอร์นั้นได้ผลการจำลองทางโปรแกรมที่เป็นจริง และมีความสามารถในการส่งผ่านกระแสออกไปยังชิ้นงานโลหะตรงจุดเริ่มต้นเชื่อม และผลจากการทดลองการเชื่อมจริงทั้งที่มี อาร์คสตาร์ทและไม่มีอาร์คสตาร์ทนำมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งจากผลการเชื่อมและตัดเซ็คชิ้นงานนั้นจะเห็นว่าแนวเชื่อมที่มีวงจรวงจรอาร์คสตาร์ทนั้นมีความซึมลึกของแนวเชื่อมที่มากกว่าอย่างเห็นได้ชัด ฉะนั้นวงจรวงจรอาร์คสตาร์ทที่ได้นำเสนอไปนั้นสามารถที่จะทำงานได้จริงกับเครื่องเชื่อมที่เป็นชนิดลวดแข็งต้น

#### 5.1 สรุป

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กล่าวถึงการทำงานของวงจรวงจรอาร์คสตาร์ทที่ใช้ในเครื่องเชื่อมชนิดลวดแข็งต้นการทดลองในงานวิจัยนี้มีทั้งแบบการจำลองผลลัพธ์ผ่านโปรแกรม P-SIM และ การทดลองจากอุปกรณ์จริง มีการคัทเซ็คตัดชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองบริเวณจุดเริ่มต้นเชื่อมเพื่อดูความซึมลึกของจุดเริ่มต้นเชื่อมจากการทดลองโดยการใช้โปรแกรม P-SIM ได้ผลการทดลองเป็นไปตามดั่งวัตถุประสงค์ โดยสิ่งที่เราต้องการจากโปรแกรมการจำลองคือ รูปภาพของกระแสอาร์คสตาร์ทที่มีลักษณะแบบโอเวอร์ชูตพุ่งขึ้นไปช่วงเวลาหนึ่งเมื่อมีการใช้โหดความต้านทานต่ำ ๆ

ในส่วนของการทดลองจากการเชื่อมจริง จะเห็นว่ารูปสัญญาณที่ได้จากการอาร์คสตาร์ทนั้นมีความใกล้เคียงกับการจำลองทางโปรแกรมอย่างมาก ซึ่งรูปสัญญาณกระแสอาร์คสตาร์ทมีลักษณะเป็นโอเวอร์ชูตพุ่งขึ้นไปเหมือนกันขณะที่ลวดเริ่มแตะที่ชิ้นงาน และจากการเชื่อมบนชิ้นงานสองแนวบนเหล็กแผ่นเดียวกันเพื่อเปรียบเทียบกันทั้งแบบมีอาร์คสตาร์ทและไม่มีอาร์คสตาร์ท แนวเชื่อมที่มีอาร์คสตาร์ทจะมีแนวเชื่อมที่โตกว่าและสะเก็ดไฟจากการเชื่อมก็น้อยกว่าด้วย และจากการตัดชิ้นงานบริเวณจุดอาร์คสตาร์ทเพื่อตรวจหาความซึมลึกนั้น แนวเชื่อมที่มีอาร์คสตาร์ทก็ให้ความซึมลึกมากกว่า

ในการทดลองจากอุปกรณ์จริง ทางผู้ทำการวิจัยได้ใช้เครื่องเชื่อมชนิดลวดแข็งต้นพิกัดแรงดันไฟฟ้าขนาด 200 โวลต์ 3 เฟส กระแสในการเชื่อมชิ้นงานอยู่ที่ 150 แอมป์ 22 โวลต์ดีซี โลหะที่ใช้ในการเชื่อมชิ้นงานเป็นเหล็กความหนาขนาด 3.2 mm ลวดเชื่อมชนิดลวดแข็งต้นที่ใช้ในการเชื่อมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ 1.2 mm และแก๊สที่ใช้ในการเชื่อมเป็นชนิด  $Co_2$

ในการทดลองเชื่อมชิ้นงานจริงนั้นได้ทำการทดลองเป็นสองแบบคือ แบบที่มีวงจรวงจรอาร์คสตาร์ทและไม่มีวงจรวงจรอาร์คสตาร์ทเพื่อเป็นการเปรียบเทียบกัน ผลลัพธ์ที่ได้คือวงจรที่มีอาร์คสตาร์ทนั้นให้ความซึมลึกของแนวเชื่อม ณ จุดเริ่มต้นเชื่อมมากกว่าแบบที่ไม่มีอาร์คสตาร์ทอย่างชัดเจน ฉะนั้นวงจรวงจรอาร์คสตาร์ทที่ได้ศึกษาและนำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถนำไปใช้และทำงานได้จริงในเครื่องเชื่อมชนิดลวดแข็งต้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. วิธีการที่ผู้วิจัยได้นำเสนอนั้นเป็นแบบฮาร์ดแวร์คอนโทรลที่ใช้ SCR แบบ module ในการคอนโทรล ในแต่ละครั้งของการอาร์คสตาร์ทอาจจะมีการสะดุดของการเชื่อมบ้างซึ่งอาจจะต้องค้นคว้าพัฒนาหาสาเหตุเพิ่มเติม วงจรนี้อาจจะยังไม่ดีที่สุดแต่อาจจะมีวงจรที่ทำให้จุดเริ่มต้นเชื่อมมีความเสถียรในการเชื่อมเร็วที่สุด ซึ่งอาจจะใช้ MOSFET หรือ IGBT ในการเป็นสวิตช์เปิด-ปิดการทำงานของวงจร
2. ศึกษาและวิจัยวงจรอาร์คสตาร์ทแบบซอฟต์แวร์เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับแบบฮาร์ดแวร์วิเคราะห์ข้อดี และ ข้อเสียในแต่ละแบบ
3. ศึกษาและวิจัยวงจรอาร์คสตาร์ทแบบใหม่ ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้ SCR ที่เป็นแบบ module ลักษณะของตัวถังที่ใหญ่อาจจะเปลืองเนื้อที่ ฉะนั้นอาจมีการพัฒนางจรให้เล็กกว่าเดิมในส่วนที่เป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง หรืออาจประยุกต์ใช้วงจรทอนระดับแรงดันอื่นๆที่สามารถใช้เป็นวงจรอาร์คสตาร์ทได้
4. รมัถระวังในการวัดสัญญาณในแต่ละจุดของเครื่องเชื่อม ก่อนลงมือทดลองศึกษาการทำงานของวงจรที่เป็นจุดเสี่ยง เพราะในแต่ละจุดมีแรงดันสูง

## เอกสารอ้างอิง

- [1] M. SAIEPOUR, J. E. HARRY, “Arc ignition using DC discharges” International Journal of Electronics, May 1991, pp 467-474,
- [2] Zhidong Yang, Chen fu Fang, Yong Chen, Zhiwei Chen, Yu Zhu,” Arc Ignition of CWW CO2 Welding in A36 Steel” Materials and Manufacturing Processes, August 2017.
- [3] Dr. Mingfei Wu and Dr. David Flynn An, “Advanced Gas Metal Arc Welding Machine Design for Low Spatter Welding.” IEEE 27th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Jun 2018.
- [4] Vladimir Pikalov, Andrei Boikov, Vladislav Znamensky, “Electronic Arc Ignition System for the Electric Arc Plasmatron” 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Nov 2020.
- [5] Tomoyuki Ueyama, “Welding power sources” Welding International, Vol. 24, No. 9, September 2010, pp 699–705
- [6] อธิษฐาน กาลุญจนแสงทอง, “ความสามารถในการเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมือร้อน SKD61 โดยกระบวนการเชื่อมโลหะแบบอาร์คโลหะแก๊สคลุม,” วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, พฤษภาคม 2559.
- [7] weldclass academy, “What is pulse MIG Basic operation Manual” pp 5-6 Oct 20212
- [8] อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ, “วงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง,” เอกสารประกอบการสอน วิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์กำลัง, หน้า 114–126, มีนาคม 2558.
- [9] Gnee GI บริษัท ข้ามชาติเทรดดิ้ง จำกัด, “Japan Industrial Standard G 3141” Company Homepage
- [10] ภูเมศวร์ แสงระยับ, อธิษฐาน เชื้อนแก้ว, พชรพล ตันทวีรุฬห์, กรรณชัย กัลยาศิริ, “การหาค่าที่เหมาะสมของการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุมสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม,” การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ครั้งที่ 55, หน้า 283–290, มกราคม 2560.
- [11] Panasonic Industrial Device Sales, “Basic Operation Manual YD-350GR3” pp 4-5, May 2002.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




ภาคผนวก ก.  
บทความทางวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 44**  
**The 44<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference (EECON-44)**  
**17-19 พฤศจิกายน 2564**  
**ณ โรงแรม ที อิมเพรส น่าน อำเภอเมืองน่าน จังหวัดน่าน**

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- โฟโตนิกส์ (PH)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)
- วิศวกรรมชีวการแพทย์ (BE)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- พลังงานหมุนเวียน (RE)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)







เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เทคนิคการหาค่าเรโซแนนซ์แบบ LC บนขดลวดตัวรับสัญญาณของเครื่องตรวจจับโลหะ

### Technical Method of LC Resonant Receiver Circuit of Metal Detector

สมพร มะหะหมัด<sup>1</sup> อนุวัฒน์ งามวนิชเลิศ<sup>2</sup>

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
เลขที่ 1 ซอยคลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทร/โทรสาร 0-2329-8330

E-mail: mahamud12pnt@gmail.com<sup>1</sup>, anuwat.ja@kmitl.ac.th<sup>2</sup>

#### บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงเทคนิคการหาค่า LC เรโซแนนซ์บนขดลวดตัวรับสัญญาณของเครื่องตรวจจับโลหะ ในกรณีที่ขดลวดตัวรับสัญญาณมีแรงดันเกินในวงจรตัวรับสัญญาณและเพื่อให้เกิดการเรโซแนนซ์บนขดลวดตัวรับและเกิดประสิทธิภาพในการตรวจจับโลหะและลดอุณหภูมิของวงจรตัวรับสัญญาณจึงต้องมีการทำให้เกิดการเรโซแนนซ์บนวงจรตัวรับสัญญาณ บทความมีการกล่าวถึงการทำงานของเครื่อง ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง การคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุที่ทำให้วงจรเกิดการเรโซแนนซ์ และการจำลองการทำงาน โดยใช้โปรแกรม Math Lab จากนั้นนำตัวเก็บประจุที่ได้จากการคำนวณไปทดสอบในวงจรการทำงานจริงและสุดท้ายคือการวัดสัญญาณก่อนและหลังของการหาค่าตัวเก็บประจุ โดยที่ประสิทธิภาพหลังจากวงจรตัวรับเกิดการเรโซแนนซ์หลังจากใส่ตัวเก็บประจุ วงจรเครื่องสามารถทำงานบนความถี่ของเครื่องได้และตรวจจับโลหะได้เช่นเดิม

**คำสำคัญ:** LC เรโซแนนซ์, สนามแม่เหล็กไฟฟ้า, เครื่องตรวจจับโลหะ

#### Abstract

This article discusses the technical method for determining the LC resonance coil receiver on the metal detector. In the receiver coil, there is overvoltage in the receiver circuit and get the resonance in its. In addition, to be effective at detecting metal and reducing the temperature of the receiver circuit needs to cause resonance on the receiver circuit. The paper discusses how the machine works. Related to the theory, the calculation of capacitor values is required to the resonant circuit and uses the MATLAB simulation to verify. Furthermore, the calculated capacitor was tested in the actual working circuit and finally the measurement. The waveforms are measured and shown before capacitor is inserted together with after the capacitor is inserted. The effectiveness of the receiver circuit is well done after the capacitor is inserted. The circuit can operate on the machine's frequency and detect metal as before.

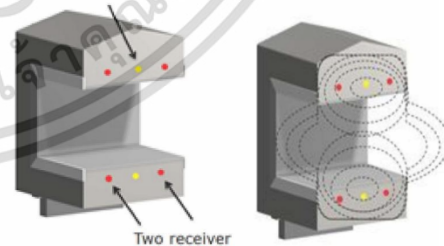
Keywords : LC Resonant , Electromagnetic , Metal detector

#### 1. บทนำ

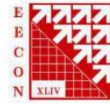
ในอุตสาหกรรมอาหารหรืออุตสาหกรรมพลาสติกมีการใช้เครื่องตรวจจับโลหะเข้าไปตรวจสอบสิ่งปนเปื้อนประเภทโลหะในกระบวนการผลิต แต่เมื่อใดที่เครื่องตรวจจับโลหะเกิดการไม่เรโซแนนซ์บนวงจรตัวรับสัญญาณทำให้เครื่องไม่สามารถตรวจจับโลหะได้ ดังนั้นค่าความหาค่าเรโซแนนซ์ของเครื่องตรวจจับโลหะบนขดลวดตัวรับที่มีความอ่อนไหวต่อการหักเหและเหนี่ยวนำของแม่เหล็กไฟฟ้าหรือแม้กระทั่งสัญญาณรบกวนจากเครื่องจักรรอบๆ หรือภายในอาคารโรงงาน จำเป็นที่จะต้องคำนวณหาแบบคณิตที่ใกล้เคียงต่อการทำงานของวงจร ฉะนั้นบทความนี้นำเสนอเทคนิคการหาค่าเรโซแนนซ์แบบ LC ของเครื่องตรวจจับโลหะเมื่อแรงดันบนขดลวดตัวรับมีค่าเกินจนวงจรไม่สามารถตรวจจับโลหะได้ ซึ่งจะมีผลการคำนวณหาค่าเรโซแนนซ์ และรูปคลื่นผลการคำนวณก่อนและหลัง โดยตัวอย่างการคำนวณเป็นกรณีที่เครื่องไม่สามารถตรวจจับโลหะได้ จากแรงดันบนขดลวดตัวรับสูงกว่าเกณฑ์ของเครื่องรับได้

#### 2. หลักการเบื้องต้นของเครื่องตรวจจับโลหะ

One transmitter coil

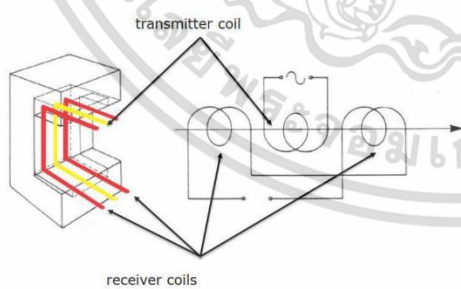


รูปที่ 1 ลักษณะและตำแหน่งการวางขดลวดตัวรับและตัวส่งภายในอุโมงค์ของเครื่องตรวจจับโลหะ

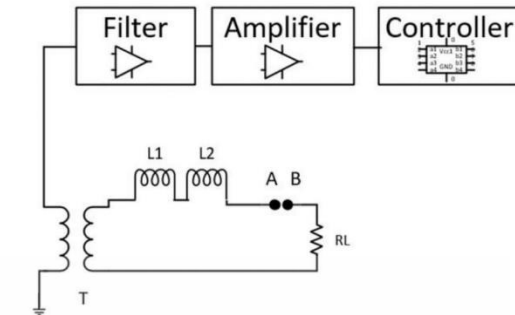


เครื่องตรวจจับโลหะสามารถตรวจหาโลหะได้โดยอาศัย หลักการสร้างความสมดุลของสัญญาณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากขดลวดส่งสัญญาณที่มีการประกอบพันอยู่ภายในเครื่องตรวจจับโลหะ เครื่องตรวจจับโลหะส่วนใหญ่จะใช้การสร้างคลื่นพลังงานที่คล้ายกับคลื่นความถี่วิทยุ โดยการสร้างความสมดุลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบขดลวดตัวนำไฟฟ้า หรือเรียกสภาวะสมดุลของพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการส่งคลื่นพลังงานจากขดลวดส่งสัญญาณ (Transmitter Coil) ไปยังขดลวดรับสัญญาณ (Receiver) ทำให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่สร้างขึ้นระหว่างขดลวดทั้งสองประเภทนี้เกิดเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติของแม่เหล็ก (Magnetic) หรือคุณสมบัติตัวนำไฟฟ้า (Electrically Conductive) เกิดเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยรอบบริเวณระหว่างขดลวดส่งสัญญาณและขดลวดตัวรับ[1]

ดังนั้นการพันขดลวดทั้งสองในตำแหน่งที่ถูกต้องและเหมาะสมในบริเวณเครื่องตรวจจับโลหะ จะมีส่วนต่อระดับความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ในบริเวณ ของเครื่องตรวจจับโลหะและมีผลต่อความสามารถในการตรวจหาวัตถุโลหะ ผลการศึกษาคุณสมบัติของโลหะที่มีคุณสมบัติทางด้านแม่เหล็ก หรือ คุณสมบัติตัวนำไฟฟ้านี้ จะมีผลต่อการตรวจจับสัญญาณของโลหะที่ปนเปื้อนมาในวัตถุที่เคลื่อนผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและถ้าระดับสัญญาณที่เกิดขึ้นระหว่างขดลวดทั้งสองประเภทนี้มีความเข้มหรือความแรงของสัญญาณอย่างเพียงพอแล้ว เครื่องตรวจจับโลหะจะตรวจวัดสัญญาณที่เกิดขึ้น และสามารถประมวลผลเพื่อทำให้ผู้ควบคุมเครื่องตรวจจับโลหะทราบถึงกรณีมีอยู่ของโลหะในวัตถุที่นำมาทดสอบ บ่งชี้ที่ส่งผลกระทบต่อความแรงของระดับสัญญาณที่เกิดขึ้นนี้ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างขดลวดทั้งสองประเภท จากภาพการจัดวางตำแหน่งของขดลวดทั้งสองประเภทตามรูปที่ 1 และรูปที่ 2 ซึ่งมีการจัดวางตำแหน่งขดลวดส่งสัญญาณอยู่กึ่งกลางและมีขดลวดตัวรับอยู่ประกอบทั้งสองด้านของขดลวดส่งสัญญาณ การกำหนดระยะห่างระหว่างขดลวดทั้งสองด้านจะต้องมีระยะห่างเท่ากันเพื่อให้



รูปที่ 2 ลักษณะการต่อวงจรขดลวดภายในอุโมงค์ของขดลวดตัวส่งและขดลวดตัวรับสัญญาณ



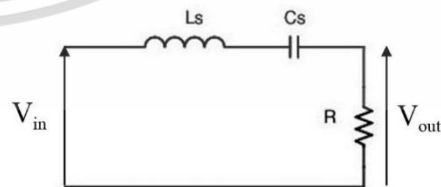
รูปที่ 3 วงจรตัวรับ (Receiver Circuit) ของเครื่องตรวจจับโลหะ ขดลวดตัวรับสัญญาณได้รับสัญญาณที่มีระดับความแรงสัญญาณเท่ากัน

ในรูปที่ 3 วงจร Receiver ของเครื่องตรวจจับโลหะการทำงานของวงจรคือ ขดลวด  $L_1$  และ  $L_2$  จะเป็นขดลวดตัวรับสัญญาณจากวงจรส่งสัญญาณ เมื่อมีการหักเหสนามแม่เหล็กเกิดขึ้น ขดลวดตัวรับจะจับสัญญาณและผ่านหม้อแปลง T และหลังจากนั้นจะผ่านวงจรฟิลเตอร์ จากนั้นจะมีการขยายสัญญาณให้แรงขึ้นผ่านวงจรแอมพลิไฟร์อร์แล้วเข้าผู้การประมวลผลที่บล็อกการทำงานที่คอนโทรลเลอร์ โดยที่แรงดันภายในวงจรตัวรับจะมีค่าประมาณ 0 ถึง 3 โวลต์ แต่เมื่อใดก็ตามที่แรงดันภายในวงจรตัวรับมีค่ามากกว่า 3 โวลต์ขึ้นไป อาจเกิดการไม่ระโชเนนซ์บนวงจรขึ้นจนไม่สามารถรับความถี่บนย่านการทำงานได้ หรือเกิดการรบกวนบนขดลวดตัวรับสัญญาณ อาจทำให้วงจรรับไม่สามารถตรวจจับโลหะได้ ฉะนั้นจึงต้องมีการทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ที่วงจรตัวรับ โดยในบทความนี้ขอยกตัวอย่างกรณีที่ทางผู้ใช้งานเครื่องได้ใช้น้ำล้างทำความสะอาดเครื่องแล้วเมื่อดำทความสะอาดและเช็คเครื่องให้แห้งแต่ปรากฏว่าเครื่องเกิดปัญหาไม่สามารถตรวจจับโลหะได้[2]

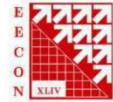
3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมจะมีลักษณะการต่อตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุอนุกรมกัน และอนุกรมกับตัวต้านทาน ซึ่งการต่อในลักษณะนี้จะให้กระแสสูงสุดและแรงดันต่ำสุด ดังรูปที่ 4 [3]

จากวงจร  $L_s$  คือ  $L_1, L_2$  ในรูปที่ 3 และ  $C_s$  เปรียบเสมือนจุด A และ B ในรูปที่ 3 ที่เราจะหาค่าตัวเก็บประจุ โดยที่ความถี่เรโซแนนซ์ของวงจร LC ก็คือความถี่ที่ทำให้ค่า  $X_L$  เท่ากับ  $X_C$  และ



รูปที่ 4 วงจรเรโซแนนซ์แบบ LC



$$\omega_L = \frac{1}{\omega_C} \quad (1)$$

โดยที่  $X_L$  = ความต้านทานของขดลวดที่มีต่อไฟกระแสสลับ  
 $X_C$  = ความต้านทานของตัวเก็บประจุที่มีต่อไฟกระแสสลับ

โดยที่ผลของการเรโซแนนซ์ในวงจรเกิดขึ้นเมื่อวงจร LC ถูกขับเคลื่อนจากแหล่งพลังงานภายนอกที่ความถี่เชิงมุม  $\omega_0$

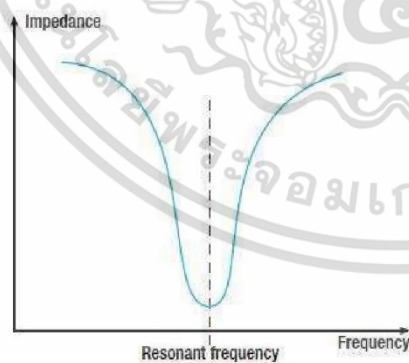
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2)$$

โดยที่ขนาดของ  $X_L$  เพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าของ  $X_C$  ลดลงตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นที่ความถี่หนึ่งปฏิกิริยาทั้งสองนี้มีขนาดเท่ากัน แต่อยู่ตรงข้ามกัน ความถี่นี้เรียกว่าความถี่เรโซแนนซ์  $f_0$

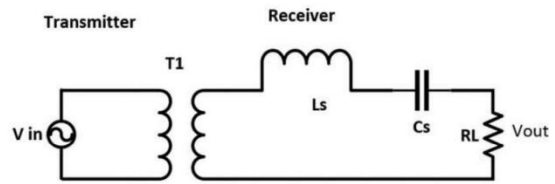
$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3)$$

ฉะนั้นสามารถคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุที่ให้อิมพีแดนซ์การเรโซแนนซ์ได้ที่สมการ (3) เมื่อได้ค่าของตัวเก็บประจุจากการคำนวณแล้วจะนำไปใส่แทนที่จุด A และ B ในวงจร Receiver Circuit ดังรูปที่ 3 โดยที่กราฟคุณสมบัติของวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมแสดงดังรูปที่ 5 จะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์ต่ำที่ความถี่เรโซแนนซ์ ทำให้กระแสไหลได้สูงสุดและแรงดันต่ำสุด [4]

4. ผลการจำลองและการทดลอง



รูปที่ 5 กราฟคุณสมบัติของวงจรเรโซแนนซ์ แบบอนุกรม



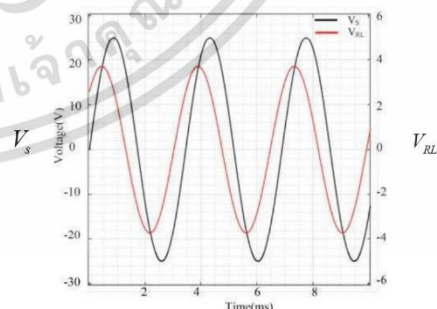
รูปที่ 6 วงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

การจำลองนั้นค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้มาจากเครื่องตรวจจับโลหะที่ใช้ในงานจริง โดยให้  $V_m$  เป็นวงจรส่งสัญญาณตัวส่งสัญญาณมีแรงดันอินพุตเท่ากับ 50 V p-p Sine ความถี่การทำงานที่ 290 kHz, โดย  $L_s$  คือผลรวมของ  $L_1$  และ  $L_2$  ในรูปที่ 3 เป็นวงจรส่งสัญญาณตัวรับสัญญาณมีค่าเท่ากับ 224 mH ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่กล่าวมาข้างต้น ได้มาจากคู่มือการแก้ปัญหาเบื้องต้นของเครื่องที่เกิดปัญหาและ  $C_s$  ที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 45 nF และหม้อแปลง T1 มีอัตราส่วนอยู่ที่ 12:1 เป็นตัวส่งผ่านสัญญาณ ระหว่างสัญญาณตัวส่งและสัญญาณตัวรับ โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ นั้นแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์จากการจำลอง

$V_m$	50 V p-p Sine
$f$	290 kHz
$L_s$	224 mH
$C_s$	45 nF
$R_L$	1.2 kΩ

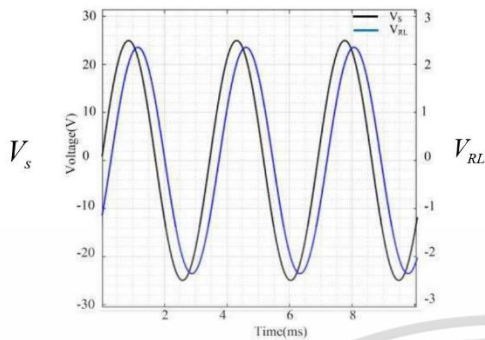
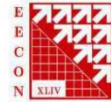
จากรูปที่ 7 และรูปที่ 8 เป็นผลการซิมูเลชันผ่านโปรแกรมจำลอง (MATLAB) โดยรูปที่ 7 เป็นสัญญาณแรงดันอินพุตเทียบกับแรงดันตกคร่อม  $R_L$  ก่อนที่จะมีการใส่ตัวเก็บประจุจากการคำนวณลงไปในวงจรตัวรับสัญญาณ



$$V_s = 10V/div, V_{RL} = 1V/div$$

รูปที่ 7 สัญญาณแรงดันตกคร่อม  $R_L$  ก่อนใส่ตัวเก็บประจุ

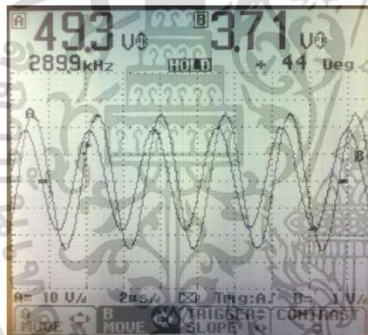
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



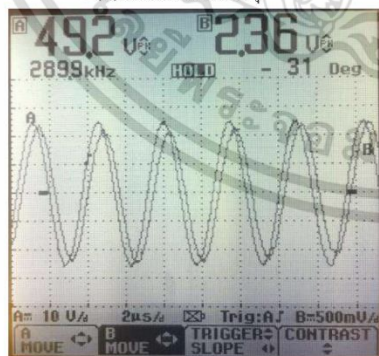
$V_S = 10V/div, V_{RL} = 500mV/div$

รูปที่ 8 สัญญาณแรงดันคคกร่อม  $R_L$  หลังใส่ตัวเก็บประจุ

รูปที่ 8 เป็นผลการซิมูเลชัน รูปคลื่นแรงดันคคกร่อม  $R_L$  หลังจากใส่ตัวเก็บประจุจากการคำนวณจะเห็นว่าแรงดันคคกร่อม  $R_L$  มีค่าลดลง และในรูปที่ 9 และรูปที่ 10 เป็นรูปคลื่นสัญญาณบนตัวเครื่องตรวจจับโลหะที่ได้ทำการทดสอบก่อนและหลังการใส่ตัวเก็บประจุ



รูปที่ 9 รูปสัญญาณแรงดันสัญญาณส่ง (A)และสัญญาณรับ (B)ก่อนใส่ตัวเก็บประจุ



รูปที่ 10 รูปคลื่นแรงดันสัญญาณส่ง (A)และสัญญาณรับ (B)หลังจากใส่ตัวเก็บประจุ

จากการทดลองนำตัวเก็บประจุที่ได้จากการคำนวณมาใส่ในวงจรตัวรับสัญญาณของเครื่องตรวจจับโลหะโดยที่สัญญาณ A คือสัญญาณส่ง ตัวส่งมีค่าเท่ากับ 49.2 โวลต์และพบว่าที่สัญญาณ B ก่อนใส่ตัวเก็บประจุ แรงดันมีค่าเท่ากับ 3.71 โวลต์ ดังรูปที่ 9 และมีเฟสหน้าสัญญาณส่งอยู่ที่ 44 องศา และหลังจากใส่ตัวเก็บประจุแรงดันในวงจรตัวรับสัญญาณลดลงเหลือ 2.36 โวลต์ และเฟสมีการตามหลังสัญญาณส่งอยู่ที่ -31 องศา เมื่อพิจารณาผลการทดลองกับผลการซิมูเลชัน จะเห็นว่าแรงดัน  $V_{RL}$  มีค่าสอดคล้องกับผลการทดลองทั้งแรงดันและเฟสของรูปสัญญาณ หลังจากนั้นได้ทดสอบการทำงานของเครื่องตรวจจับโลหะพบว่าเครื่องสามารถตรวจจับโลหะได้ตามปกติ ตรงตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่ต้องการให้แรงดันบนวงจรตัวรับสัญญาณมีค่าลดลง

5. สรุป


จากการคำนวณและการซิมูเลชันทดลองจะเห็นว่าเมื่อนำตัวเก็บประจุที่ได้จากการคำนวณมาใส่ในวงจรตัวรับแทนที่จุด A B ของเครื่องตรวจจับโลหะค่าแรงดันที่  $V_{out}$  ของวงจรตัวรับสัญญาณมีค่าลดลงเป็นจริงและทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ โดยที่ผลการทดลองจากการใช้เครื่องตรวจจับโลหะจะมีความผิดพลาดจากการตั้งค่าเล็กน้อย ทำให้ผลที่ได้จะมีความคลาดเคลื่อนจากผลซิมูเลชันที่ได้จากการคำนวณที่ใช้ตัวเลขที่ลงตัว แต่อย่างไรก็ตามแรงดัน  $V_{out}$  ที่ได้ก็ยังคงสอดคล้องกัน ดังนั้นจึงสามารถนำวิธีการนี้ไปใช้กับวงจรโซเนนซ์กับเครื่องจักรอื่นๆ ที่ใช้วงจรนี้ในการควบคุมได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ชวิวัฒน์ชัย ขำวิจิตรภรณ์, “ความรู้พื้นฐานสำหรับเครื่องตรวจจับโลหะ,” เอกสารประกอบการอบรม Fortress Technology Inc, V2-1 2 99.
- [2] S+S Separation and Sorting Technology GmbH, “Basic operation metal detector,” Instruction manual GLS400/50/289 pp 7-8, June 2002.
- [3] ยมาคม แยมมณฑา, “อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ความถี่สูงแบบแอตซีโซเนนซ์สำหรับเครื่องจัดค้ไฟฟ้า,” วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พฤษภาคม 2559.
- [4] ยมาคม แยมมณฑา กพ จันทรเจริญสุข และ อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ, “A High-Frequency LCC Resonant Half-Bridge Inverter for Electrosurgical Generators,” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8, หน้า 103-106, พฤษภาคม 2559.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





**การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 10**  
**The 10<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network 2018**

วันที่ 1 - 3 พฤษภาคม พ.ศ. 2561  
 ณ โรงแรมราชศุภมิตร-อาร์.เอส. โฮเต็ล (R.S. Hotel) อำเภอเมือง จังหวัดกาญจนบุรี

**วิศวกรรมไฟฟ้า เพื่อการพัฒนา ให้ชาติก้าวหน้า  
 สู่ความมั่นคง รุ่งเรือง ยั่งยืน**  
**ELECTRICAL ENGINEERING FOR NATIONAL DEVELOPMENT  
 TO STABILITY, WEALTHIEST AND SUSTAINABILITY**

**Conference Topics**

1) Electrical Power (PW)	11) ไฟฟ้ากำลัง
2) Power Electronics (PE)	12) อิเล็กทรอนิกส์กำลัง
3) Electronics (EL)	13) อิเล็กทรอนิกส์
4) Electric Communication (CM)	14) ไฟฟ้าสื่อสาร
5) Control Systems and Instrumentation (CT)	15) ระบบควบคุมและกาารวัด
6) Computer and Information Technology (CP)	16) คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ
7) Digital Signal Processing (DS)	17) การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล
8) Energy and Energy Saving (ES)	18) พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน
9) Innovation and Inventor (IN)	19) นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์
10) General Electrical Engineering (GN)	20) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 10

Proceedings of the 10<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network 2018 (EENET 2018)

## วงจรรีเซ็ตสำหรับเครื่องเชื่อมชนิดลวดแข็งตัน Arc Ignition for Welding Machine by using Solid-Wire

สมพร มะหะหมัด<sup>1</sup> อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ<sup>2</sup>

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
เลขที่ 1 ซอยคลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทร./โทรสาร 0-2329-8330  
E-mail: mahamud\_pnt@hotmail.com<sup>1</sup>, anuwat.ja@kmitl.ac.th<sup>2</sup>

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับจุดเริ่มต้นการเชื่อมเหล็กบนเครื่องเชื่อมชนิดที่เป็นอินเวอร์เตอร์แบบลวดแข็งตัน เพราะเหล็กก่อนที่จะเตรียมทำการเชื่อมนั้นตัวเหล็กเองจะอยู่ในอุณหภูมิที่เย็น เวลาเชื่อมเหล็กที่จุดเริ่มต้นเชื่อมโดยไม่มีวงจรที่ช่วยในการเชื่อมนั้นแนวซิมลิกอาจจะมีไม่ดีพอหรือซิมลิกไม่ดีเลย ฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงได้มีการนำเสนอมวงจรที่จะมาควบคุมแรงดันในการอาร์คสตาร์ท มาช่วยให้จุดเริ่มต้นเชื่อมมีการซิมลิกที่ดี โดยใช้หลักการของการชาร์จประจุไฟฟ้าและคายประจุไฟฟ้าของวงจรควบคุมแรงดันอาร์คสตาร์ท และมีสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นตัวเปิด-ปิดวงจร ควบคู่กับแรงดันเอาต์พุตของเครื่องเชื่อมอินเวอร์เตอร์ที่เป็นชนิดลวดแข็งตันถ่ายกระแสพลังงานขึ้นมาขณะเริ่มต้นเชื่อมเพิ่มขึ้นอีก และมีผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรรีเซ็ตอาร์ค ขณะวงจรเริ่มต้นทำงานมาประกอบการทำงานของวงจร โดยใช้โปรแกรม Orcad PSpice ในการซิมูเลชัน และเมื่อได้ผลที่ถูกต้องแล้วก็สามารถนำผลที่ได้ไปออกแบบอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์อาร์คสตาร์ทเพื่อนำไปทดลองงานจริงได้

คำสำคัญ: ชาร์จ, ดิสชาร์จแรงดันไฟฟ้า, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

Abstract

This research describes the arc ignition of welding machine that is an inverter using solid-wire. The workpiece is cool before welding. While welding without arc ignition circuit, the penetration of welding is bad or worse. Therefore, this paper presents the voltage control of arc ignition circuit for the help of arc start point for good penetration. Based on the charge and discharge, the voltage is controlled by arc ignition circuit with power semiconductor switches. In addition, the controlled voltage is increased while starting to weld by using solid-wire. The simulation result of arc ignition circuit is considered and designed by using Orcad PSpice program. When the

simulation results are corrected, the actual hardware of arc ignition is designed and implemented

Keywords : Charge and discharge electrical voltage, power electronic

### 1. บทนำ

จากสภาวะการขยายตัวในวงการอุตสาหกรรมไทย ในปัจจุบันจะพบว่า ประเทศของเรามีการขยายตัวในด้านอุตสาหกรรมอย่างมาก วิธีการผลิตหรือจัดทำในอุตสาหกรรม ซึ่งมีอยู่ขึ้นเกี่ยวข้องกับวัสดุหรือชิ้นงานจำพวกโลหะเป็นส่วนมาก ซึ่งอาจจะเป็นการใช้ในการทำเครื่องมือหรือเครื่องจักรต่าง ๆ หรือในการก่อสร้างก็อาจจะมีโครงสร้างที่เป็นโลหะ แต่อุตสาหกรรมเชื่อมเหล็กที่สำคัญในประเทศไทยก็คือ อุตสาหกรรมยานยนต์ ซึ่งงานเชื่อมในอุตสาหกรรมยานยนต์ส่วนใหญ่ นั้น แนวเชื่อมจะต้องมีการซิมลิกที่ดีได้มาตรฐานและมีความปลอดภัยกับผู้ใช้งาน ยนต์ แต่เมื่อมีการเปลี่ยนรุ่นของรถยนต์ใหม่ทางผู้ประกอบการก็จะมีการทดสอบชิ้นงานตัวใหม่ (Trial) ซึ่งชิ้นงานบางชิ้นอาจจะเป็นชิ้นงานที่มีการป้องกันความปลอดภัยสูงให้กับผู้ใช้งาน ยนต์อาจจะต้องมีความเข้มงวดในจุดนี้ ซึ่งปัญหาสำคัญของ การทดสอบแนวซิมลิกของชิ้นงานต้นแบบตัวแรกก็คือแนวซิมลิกไม่ได้มาตรฐาน โดยเฉพาะจุดเริ่มต้นของแนวเชื่อม (Arc Start) เพราะว่าเหล็ก ก่อนที่จะทำการเชื่อมนั้นจะอยู่ในอุณหภูมิที่เย็นตัว แนวซิมลิกบริเวณนี้ ก็จะซิมลิกน้อยกว่าแนวหลังจากการเชื่อมไปได้สักระยะ ทำให้สิ้นเปลือง ชิ้นงาน ในการทดสอบมากมาย สิ้นเปลืองงบประมาณ และเสียเวลา ในการทดสอบ บังคับดังกล่าวจึงทำให้เกิดมีการค้นคว้าและวิเคราะห์ เกี่ยวกับงานเชื่อม เราจะมีวิธีการอย่างไรที่จะช่วยให้จุดเริ่มต้นของการเชื่อมนั้นมีการซิมลิกที่ดีได้มาตรฐาน ดังนั้นทางผู้วิจัย จึงสังเกตเห็นว่าจะมีวงจรอะไรที่จะมาช่วยในการสตาร์ทการเชื่อมให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้นลดการสิ้นเปลืองชิ้นงานที่นำมาทดสอบ ลดค่าใช้จ่ายของชิ้นงานและพลังงานไฟฟ้า และลดเวลาในการทดสอบ ชิ้นงานต้นแบบที่จะนำมาใช้ในการผลิตด้วย

1-3 พฤษภาคม พ.ศ. 2561 โรงแรมราชศุภมิตร อารี.เอส. โฮเต็ล (R.S. Hotel) อำเภอเมือง จังหวัดกาญจนบุรี

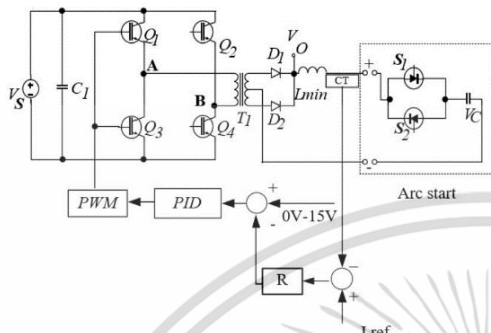
บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 10

Proceedings of the 10<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network 2018 (EENET 2018)

2. หลักการเบื้องต้นของเครื่องเชื่อมอินเวอร์เตอร์และวงจรอาร์คสตาร์ท

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

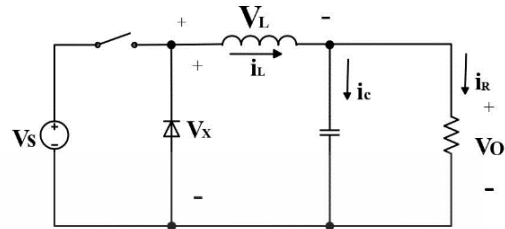


รูปที่ 1 ไลดอะแกรมของเครื่องเชื่อมอินเวอร์เตอร์ที่ทำงานร่วมกับวงจรอาร์คสตาร์ท

หลักการทำงานเบื้องต้นของวงจรอาร์คสตาร์ทคือ โดยวงจรจะประกอบไปด้วย ตัวเก็บประจุ และสวิตซ์กำลัง SCRs ต่อแบบขนานกลับหัว (anti-parallel) ซึ่งเป็นหัวใจหลัก ของวงจร ซึ่งมีรูปโครงสร้างวงจรดังแสดงในรูปที่ 1 เมื่อเริ่มการทำงาน วงจรอินเวอร์เตอร์ของเครื่องเชื่อมจะจ่ายแรงดันไฟฟ้า (Vo) ขณะ ไม่มีโหลด โดยจะมีค่าแรงดันขนาดอนที่ปลายลวดเชื่อมยังไม่แตะชิ้นงานแรงดันจะอยู่ที่ประมาณ 65V<sub>dc</sub> และมีแรงดันอินพุต Vs เท่ากับ 240 Vdc และมีดีวีไอซี (D) ของการสวิตซ์เท่ากับ 0.3 และกระแสสูงสุดของเครื่องเชื่อมอยู่ที่ 350A แรงดันขณะ ไม่มี โหลดตรงนี้จะเข้าไปจ่ายให้กับวงจรอาร์คสตาร์ทแรงดันเอาต์พุตของเครื่องเชื่อมที่ได้จะทำให้กระแสไหลผ่าน S<sub>1</sub> และหลังจากนั้นกระแสจะไหลผ่านเข้าตัวเก็บประจุ และตัวเก็บประจุก็จะทำการชาร์จพลังงาน และก็จะดีสชาร์จและคายพลังงานตอนที่ลวดแตะชิ้นงานไหลออกผ่าน S<sub>2</sub> ส่งผลให้กระแสไหลไปเอาต์พุตของเครื่องเชื่อมอีกที เมื่อลวดเชื่อมไหลลงแตะชิ้นงานที่เป็นเหล็ก[1] แรงดันและกระแสที่ได้จากการคายประจุของวงจรอาร์คสตาร์ทก็จะไปอุ่นชิ้นงาน (preheat) จน ลวดเริ่มต้นเชื่อมให้มีการจุดการอาร์คสตาร์ทที่ดียิ่งขึ้น โดยที่ ดีวีไอซีของวงจรอินเวอร์เตอร์หาได้จากสมการที่ (1)

$$\frac{V_o}{V_s} = 2aD \tag{1}$$

โดยที่ a คือ Turn ratio ของหม้อแปลงอินเวอร์เตอร์ = 3/1



รูปที่ 2 วงจรทอนระดับแรงดัน

วงจรอาร์คสตาร์ทที่เปรียบเสมือนเป็นวงจรที่ทำหน้าที่ทอนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (buck) ดังในรูปที่ 2 โดยที่ ดีวีไอซี (D) ในวงจรทอนระดับแรงดันหาได้จาก สมการที่ (2)

$$D = \frac{V_o}{V_s} \tag{2}$$

โดยที่ค่า D ที่ได้มีค่าเท่ากับ 0.3

วงจรนี้จะทำหน้าที่ทอนระดับแรงดันจะจ่ายกลับสู่ภาระทางไฟฟ้า ดังนั้นการเลือกใช้ค่าตัวเหนี่ยวนำ จึงจำเป็นต้องเลือกค่าที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถทำงานได้แบบกระแสต่อเนื่องในทั้งสองลักษณะการทำงาน โดยสามารถคำนวณค่า ตัวเหนี่ยวนำ L<sub>min</sub> ที่สามารถทำงานแบบกระแสต่อเนื่องได้ในวงจรทอนระดับ โดยมีแรงดันไฟฟ้าขาออกของเครื่องเชื่อมขณะไม่มีโหลด (V<sub>o</sub>) มีค่าเท่ากับ 65 V<sub>dc</sub> ความถี่ (f) ของเครื่องเชื่อมมีค่าเท่ากับ 16 kHz และค่ากระแสต่ำสุดที่เครื่องเชื่อมสามารถเชื่อมงาน ได้อยู่ที่ (I<sub>o</sub>) 50 A ดังสมการที่ 3 [2]

$$L_{min} = \frac{(1-D)}{2f} \times \frac{V_o}{I_o} \tag{3}$$

เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ จะได้ L<sub>min</sub> = 40 uH

จากนั้นคำนวณหาตัวเก็บประจุ (C) ของวงจรอาร์คสตาร์ทได้จากสมการที่ 4 [3]

$$C = \frac{(1-D)}{8L_{min}f^2} \frac{\Delta V_o}{V_o} \tag{4}$$

โดยที่ ΔV<sub>o</sub> เป็นค่าริบเปิลของแรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ 0.5 V

เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์จะได้ค่า C= 4,700 uF

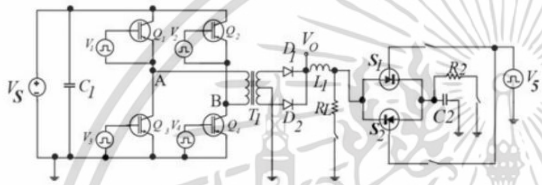
บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 10

Proceedings of the 10<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network 2018 (EENET 2018)

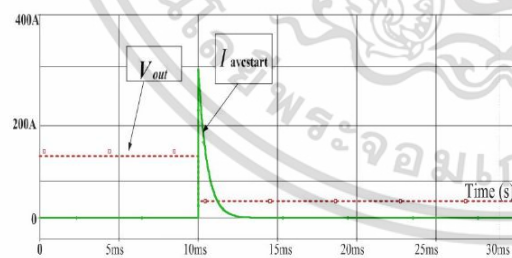
4. การจำลองด้วย โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โปรแกรม Orcad PSpice 16.0 ในการจำลองการทำงานเพื่อดูผลของกราฟแรงดันและกระแสต่างๆ ของวงจรรีเลย์สแตตส์แล้วนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง ซึ่งมีโครงสร้างวงจรในการจำลองดังแสดงในรูปที่ 3 จากวงจรมุมูลฐานใช้ IGBT เป็นวงจรถับอินเวอร์เตอร์ให้เปรียบเสมือนเครื่องเชื่อมที่ใช้ IGBT เช่นเดียวกัน ใช้ความถี่ในการซิมมูลชัน 16 kHz เวลาในการให้  $S_1$  และ  $S_2$  ทำงานอยู่ที่ 0s เวลาในการให้วงจรมูลฐานรีเลย์สแตตส์อยู่ที่ 0.5s,  $R_L = 0.1 \Omega$ , และ CAPACITOR (C2) = 4700 uF และ L ( $L_{min}$ ) = 40uH



รูปที่ 3 โครงสร้างวงจรที่ใช้ในการจำลอง

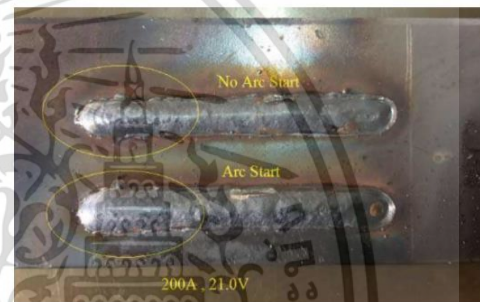
จากรูปกราฟที่ได้จากการซิมมูลชันในรูปที่ 4 จะเห็นว่าเส้นประเป็นแรงดันเอาต์พุตสูงสุดตอนไม่มีโหลด เมื่อถึงช่วงเวลาที่เพิ่มโหลดด้วยความต้านทานต่ำๆ โดยให้  $R_L$  เป็นจุดอาร์คสแตตส์และเป็นตำแหน่งของลวดเชื่อม แรงดันเอาต์พุตจะตกลงมาและกระแสอาร์คสแตตส์เส้นทึบจะอยู่เหนือแรงดันอินเวอร์เตอร์มีลักษณะเหมือนกระแสไอเวอร์พุ่งขึ้นไป ซึ่งลักษณะรูปสัญญาณเช่นนี้เป็นรูปสัญญาณที่ต้องการจากการซิมมูลชัน



รูปที่ 4 ผลการจำลองด้วย โปรแกรม แรงดันเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ (เส้นประ) กระแสอาร์คสแตตส์ (เส้นทึบ)

5. การทดสอบและผลการทดสอบ

การทดสอบโดยการนำวงจรรีเลย์สแตตส์ไปต่อเข้ากับเอาต์พุตของเครื่องเชื่อม จากนั้นทดลองเชื่อมงานจริงโดยการทดลองนี้ใช้เหล็กขนาด 3.2 mm ลวดเชื่อมขนาด 1.2mm และแก๊สที่ใช้ในการเชื่อมเป็นชนิด CO<sub>2</sub> โดยทำการเชื่อมแบบไม่มีวงจรรีเลย์สแตตส์ และมีวงจรรีเลย์สแตตส์เปรียบเทียบกับ ที่กระแสเชื่อม 200A, 21.0V และทำการตัดเช็คตัดชิ้นงานบริเวณจุดอาร์คสแตตส์ ตรวจสอบเช็คระยะความซึมลึกของชิ้นงานเปรียบเทียบกับ จากในรูปที่ 5 จะเห็นว่าแนวเชื่อมบนนั้นเป็นแนวเชื่อมที่ไม่มีอาร์คสแตตส์ จุดเริ่มต้นแนวเชื่อมจะเล็กกว่าแนวเชื่อมที่มีอาร์คสแตตส์ที่เป็นแนวเชื่อมล่าง และผลจากการตัดเช็คแนวเชื่อมเพื่อดูความซึมลึกในรูปที่ 6 นั้นจะเห็นว่าแนวเชื่อมที่มีวงจรรีเลย์สแตตส์จะมีความซึมลึกมากกว่างานจริงที่ไม่มีอาร์คสแตตส์



รูปที่ 5 แนวเชื่อมเปรียบเทียบกันระหว่างไม่มีอาร์คสแตตส์และมีอาร์คสแตตส์



(ก) (ข)

รูปที่ 6 แนวเชื่อมตัดเช็คซึมลึกเปรียบเทียบกันระหว่างไม่มีอาร์คสแตตส์ (ก) และมีอาร์คสแตตส์ (ข)

จากรูปที่ 6 จะเห็นว่ารูป (ก) ไม่มีวงจรรีเลย์สแตตส์ระยะแนวซึมลึกจากพื้นผิวเหล็กเท่ากับ 1.326 mm และความกว้างของแนวเชื่อมเท่ากับ 6.928 mm จะน้อยกว่ารูป(ข) ที่มีวงจรรีเลย์สแตตส์ซึ่งมีระยะความซึมลึก

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 10

Proceedings of the 10<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network 2018 (EENET 2018)

จากพื้นที่ผิวเหล็กเท่ากับ 1.4701 mm และความกว้างของแนวเชื่อมเท่ากับ 10.255 mm ที่กระแสเชื่อม 200A, 21.0V เท่ากัน

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบความซึมลึกที่กระแสต่างกัน

กระแสเชื่อม	ความหนาของเหล็ก	ซึมลึก
150A	3.2mm	1.3612mm
200A	3.2mm	1.4701mm
270A	3.2mm	1.6971mm

จากตารางที่ 1 เป็นผลการคิดเชิงความซึมลึกของชิ้นงาน จะเห็นว่าเมื่อเชื่อมเหล็กที่ความหนาเท่ากันแต่กระแสเชื่อมต่างกัน ยิ่งกระแสเชื่อมมากขึ้นความซึมลึกของจุดอาร์คสตาร์ทจะยิ่งลึกขึ้นตาม



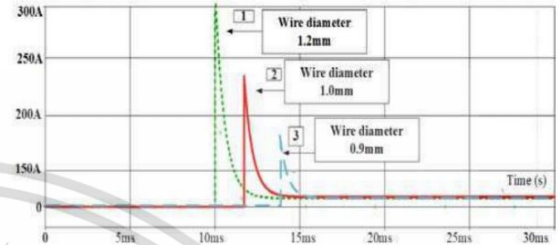
Volt/div= 50 , Current/div=200 A/div , time/div=10 mv/div

รูปที่ 7 ผลการทดลอง แรงดันเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ (Vout) กระแสอาร์คสตาร์ท (Iarcstart)

จากรูปกราฟผลการทดลองในรูปที่ 7 (Vout) เป็นแรงดันเอาต์พุตขณะทำการเชื่อมเมื่อลวดตะขังงาน แรงดันจะตกลงมาเป็นแรงดันที่ปรับไว้เชื่อมชิ้นงานจริงซึ่งตั้งไว้ที่ 21.0V และ (Iarcstart) เป็นกระแสอาร์คสตาร์ทมาช่วยในการอุ่นชิ้นงาน ช่วงเริ่มต้นการเชื่อมชิ้นงาน โดยที่กระแสอาร์คสตาร์ทมีค่าอยู่ที่ 300 A ช่วงเวลาอยู่ที่ 5ms ซึ่งเพียงพอต่อการอุ่นชิ้นงานงาน

รูปที่ 8 จะเห็นว่าเมื่อเปลี่ยนขนาดของลวดเชื่อมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน กระแสอาร์คสตาร์ทก็จะต่างกันด้วย โดยที่เส้นกราฟที่ 1 เป็นกระแสอาร์คสตาร์ทของลวดเชื่อมขนาด 1.2mm เส้นที่ 2 เป็นกระแสอาร์คสตาร์ทของลวดเชื่อมขนาด 1.0mm และเส้นที่ 3 เป็นกระแสอาร์คสตาร์ทของลวดเชื่อมขนาด 0.9mm ฉะนั้นจะเห็นว่ากระแสอาร์คสตาร์ทไม่ได้ขึ้นอยู่กับการปรับเปลี่ยนกระแสการเชื่อมชิ้นงาน แต่

กระแสอาร์คสตาร์ทจะขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงขนาดของลวดเชื่อม ที่นำมาเชื่อมชิ้นงาน เพราะลวดเชื่อมที่ใหญ่ขึ้น ความต้านทานก็จะน้อยลง กระแสอาร์คสตาร์ท ก็ต้องมากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 8 กราฟกระแสจุดอาร์คสตาร์ทของเครื่องที่ขนาดของลวดเชื่อมต่างกัน

6. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวงจรอาร์คสตาร์ทต้นแบบสำหรับเครื่องเชื่อมชนิดลวดแข็งต้นแบบจากการใช้โปรแกรมการทดลองวงจรอาร์คสตาร์ทต้นแบบจะเห็นว่าสิ่งที่เราต้องการจากวงจร คือกระแสโอเวอร์ชู้ตที่ได้จากการคายประจุของคาปาซิเตอร์นั้นได้ผลการเชื่อมลึกลงที่เป็นจริงและมีความสามารถในการส่งผ่านกระแสออกไปอุ่นชิ้นงานได้โดยตรงจุดเริ่มต้นเชื่อม และผลจากการทดลองการเชื่อมจริงทั้งที่มีอาร์คสตาร์ทและไม่มีอาร์คสตาร์ทนำมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งจากการเชื่อมและกัดสีที่ชิ้นงานนั้นจะเห็นว่าแนวเชื่อมที่มีวงจรอาร์คสตาร์ทนั้นมีความซึมลึกของแนวเชื่อมที่มากกว่าอย่างเห็นได้ชัด ฉะนั้นวงจรอาร์คสตาร์ทที่ได้แนะนำไปนั้นสามารถที่จะทำงาน ได้จริงกับเครื่องเชื่อมที่เป็นชนิดลวดแข็งต้น

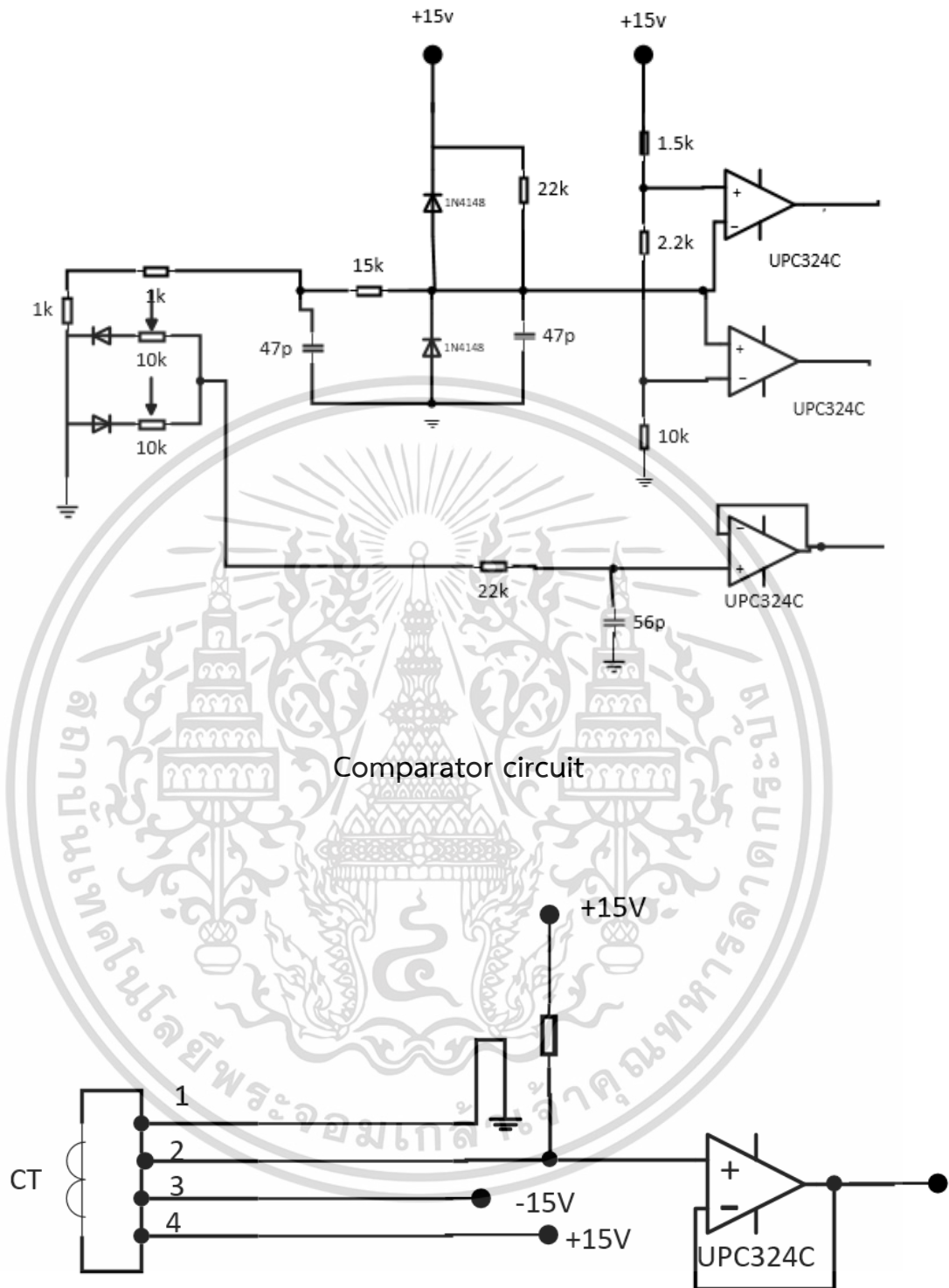
เอกสารอ้างอิง

- [1] อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ, “วงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง,” เอกสารประกอบการสอน วิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์กำลัง, หน้า 114–126, มีนาคม 2558.
- [2] ปรมศ จิตเจนการ, “Intelligent charger of electric vehicle for supporting with smart grid,” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5, หน้า 244–249, พฤษภาคม 2556.
- [3] ปรมศ จิตเจนการ, “Battery charger for Electric Vehicles supporting to Energy Backup in Smart Grid,” วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พฤษภาคม 2556.



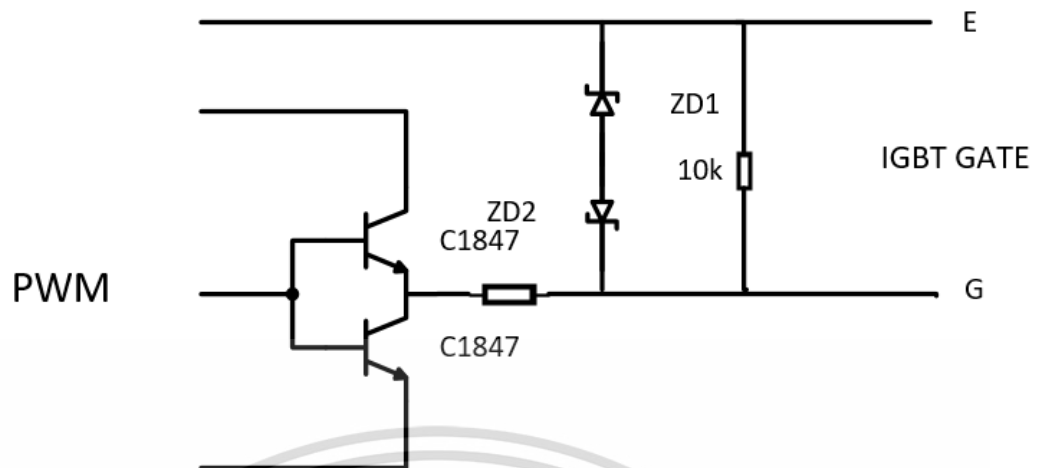
ภาคผนวก ข.  
วงจรรายในบางส่วนของเครื่องเชื่อมชนิดลวดแข็งต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Current Control Circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Drive Control IGBT Circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค.

คุณลักษณะและรายละเอียดของอุปกรณ์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# THYRISTOR MODULE

## PK(PD,PE,KK)25F

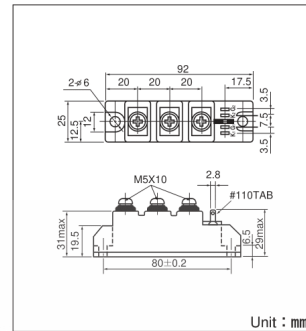
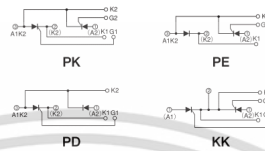
UL:E76102(M)

Power Thyristor/Diode Module **PK25F** series are designed for various rectifier circuits and power controls. For your circuit application, following internal connections and wide voltage ratings up to 1,600V are available. High precision 25mm (1inch) width package and electrically isolated mounting base make your mechanical design easy.

- $I_{T(AV)}$  25A,  $I_{T(RMS)}$  39A,  $I_{TSM}$  580A
- $di/dt$  100 A/ $\mu$ s
- $dv/dt$  500V/ $\mu$ s

**(Applications)**

Various rectifiers  
AC/DC motor drives  
Heater controls  
Light dimmers  
Static switches



**Maximum Ratings**

Symbol	Item	Ratings				Unit
		PK25F40 PD25F40 PE25F40 KK25F40	PK25F80 PD25F80 PE25F80 KK25F80	PK25F120 PD25F120 PE25F120 KK25F120	PK25F160 PD25F160 PE25F160 KK25F160	
$V_{RRM}$	* Repetitive Peak Reverse Voltage	400	800	1200	1600	V
$V_{RSM}$	* Non-Repetitive Peak Reverse Voltage	480	960	1300	1700	V
$V_{DRM}$	Repetitive Peak Off-State Voltage	400	800	1200	1600	V

Symbol	Item	Conditions	Ratings	Unit
$I_{T(AV)}$	* Average On-State Current	Single phase, half wave, 180° conduction, $T_c : 96^\circ\text{C}$	25	A
$I_{T(RMS)}$	* R.M.S. On-State Current	Single phase, half wave, 180° conduction, $T_c : 96^\circ\text{C}$	39	A
$I_{TSM}$	* Surge On-State Current	$\frac{1}{2}$ cycle, 50Hz/60Hz, peak Value, non-repetitive	530/580	A
$I^2t$	* $I^2t$	Value for one cycle of surge current	1400	A <sup>2</sup> S
$P_{GM}$	Peak Gate Power Dissipation		10	W
$P_{G(AV)}$	Average Gate Power Dissipation		1	W
$I_{FGM}$	Peak Gate Current		3	A
$V_{FGM}$	Peak Gate Voltage (Forward)		10	V
$V_{RGM}$	Peak Gate Voltage (Reverse)		5	V
$di/dt$	Critical Rate of Rise of On-State Current	$I_G=100\text{mA}$ , $T_j=25^\circ\text{C}$ , $V_D=\frac{1}{2}V_{DRM}$ , $dI_G/dt=0.1\text{A}/\mu\text{s}$	100	A/ $\mu$ s
$V_{ISO}$	* Isolation Breakdown Voltage (R.M.S.)	A.C. 1minute	2500	V
$T_j$	* Operating Junction Temperature		-40 to +125	$^\circ\text{C}$
$T_{stg}$	* Storage Temperature		-40 to +125	$^\circ\text{C}$
	Mounting Torque	Mounting (M5)	Recommended Value 1.5-2.5 (15-25)	N·m
		Terminal (M5)	Recommended Value 1.5-2.5 (15-25)	(kgf·cm)
	Mass		170	g

**Electrical Characteristics**

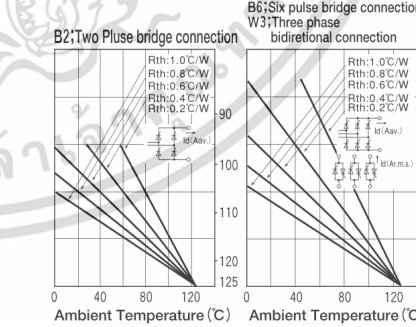
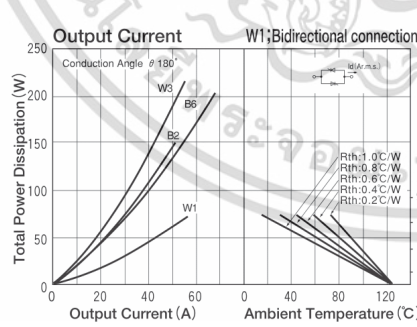
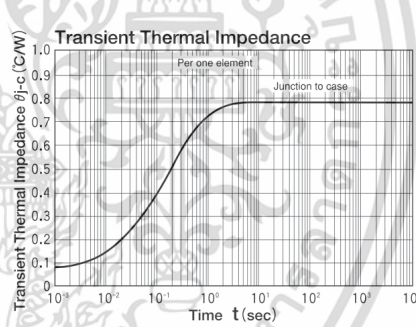
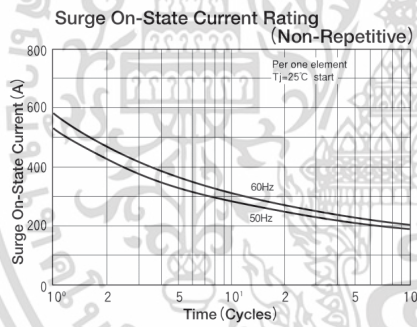
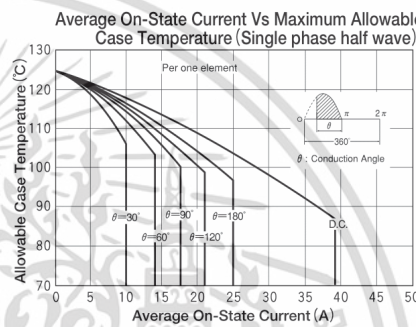
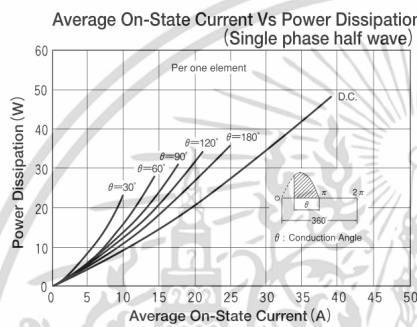
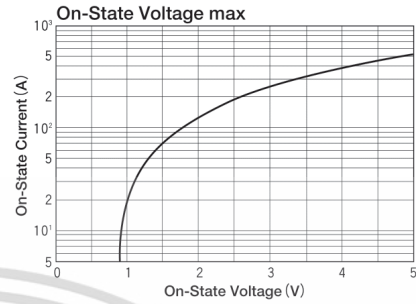
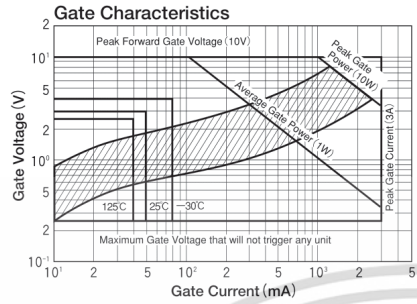
Symbol	Item	Conditions	Ratings	Unit
$I_{DRM}$	Repetitive Peak Off-State Current, max.	at $V_{DRM}$ , single phase, half wave, $T_j=125^\circ\text{C}$	10	mA
$I_{RRM}$	* Repetitive Peak Reverse Current, max.	at $V_{DRM}$ , single phase, half wave, $T_j=125^\circ\text{C}$	10	mA
$V_{TM}$	* Peak On-State Voltage, max.	On-State Current 75A, $T_j=25^\circ\text{C}$ Inst. measurement	1.55	V
$I_{GT}/V_{GT}$	Gate Trigger Current/Voltage, max.	$T_j=25^\circ\text{C}$ , $I_T=1\text{A}$ , $V_D=6\text{V}$	50/3	mA/V
$V_{GD}$	Non-Trigger Gate, Voltage, min.	$T_j=125^\circ\text{C}$ , $V_D=\frac{1}{2}V_{DRM}$	0.25	V
$t_{gt}$	Turn On Time, max.	$I_T=25\text{A}$ , $I_G=100\text{mA}$ , $T_j=25^\circ\text{C}$ , $V_D=\frac{1}{2}V_{DRM}$ , $dI_G/dt=0.1\text{A}/\mu\text{s}$	10	$\mu\text{s}$
$dv/dt$	Critical Rate of Rise of Off-State Voltage, min.	$T_j=125^\circ\text{C}$ , $V_D=\frac{2}{3}V_{DRM}$ , Exponential wave.	500	V/ $\mu$ s
$I_H$	Holding Current, typ.	$T_j=25^\circ\text{C}$	50	mA
$I_L$	Latching Current, typ.	$T_j=25^\circ\text{C}$	100	mA
$R_{th(j-c)}$	* Thermal Impedance, max.	Junction to case	0.78	$^\circ\text{C}/\text{W}$

\* mark : Thyristor and Diode part. No mark : Thyristor part

SanRex 50 Seaview Blvd. Port Washington, NY 11050-4618 PH.(516)625-1313 FAX(516)625-8845 E-mail: semi@sanrex.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**PK(PD,PE,KK)25F**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้