

การศึกษาลักษณะของเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้า
ในบดลวดที่เกิดจากโลหะโดยใช้การเหนี่ยวนำด้วยพัลส์

A Study of Zero-Crossing Time Response
of Coil Current Generated from Metal
by Using Pulse Induction

สุทัศน์ แยกกระจ่าง*

ปัญญวีร์ จามจรีกุล**

Sutas Kaekrajang

Punyawi Jamjareekul

* นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และโทรคมนาคม บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยธรรมาภิบาล

Graduate Student, Department of Computer and Telecommunication Engineering, Graduate
School, Dhurakij Pundit University.

**อาจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมาภิบาล

Lecturer, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Dhurakij Pundit University.

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่เกิดจากโลหะโดยใช้การเหนี่ยวนำด้วยพัลส์ โดยมีเป้าหมายในการทำวิจัยคือ 1) สร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่เปิด/ปิดสัญญาณ PWM ให้แก่ขดลวดและส่งผ่านไปยังโลหะที่วางห่างออกไปไม่เกิน 15 ซม. ได้ 2) เขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ATmega168 ให้สามารถควบคุมการทำงานและสร้างสัญญาณ PWM ที่มีความกว้างขนาดต่างๆ ในการทดสอบหาคุณลักษณะของโลหะแต่ละชนิดได้ 3) หาวีธีในการอ่านค่า จัดเก็บค่า และวิเคราะห์ผลการทดสอบ เพื่อที่จะสร้างกราฟที่ระบุถึงผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่เกิดจากโลหะแต่ละชนิดได้ และ 4) เป็นแนวทางในการสร้างเครื่องตรวจจับโลหะในอนาคตต่อไป จากการทดสอบ พบว่า วงจรเปิด/ปิดสัญญาณ PWM ให้แก่ขดลวดและโปรแกรมควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถทำงานตามที่ต้องการได้เป็นอย่างดีและโลหะแต่ละชนิดให้เส้นกราฟผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่แตกต่างกันโดยสิ้นเชิง โดยผลตอบสนองของโลหะแต่ละชนิด ณ ระยะห่างแต่ละค่าจะถูกอ่านค่าได้แน่นอนโดยไมโครคอนโทรลเลอร์และถูกนำมาพล็อตกราฟ ซึ่งกราฟเหล่านี้ล้วนแล้วแต่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน อย่างไรก็ตาม ถ้าโลหะอยู่ห่างจนกระทั่งขดลวดไม่สามารถจะรับ Eddy Current ที่เกิดขึ้นในโลหะได้ ผลต่างของระยะเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ กล่าวคือ โลหะดังกล่าวไม่สามารถจะถูกตรวจจับได้ นอกจากนี้ ระยะห่างในการทดสอบยังขึ้นอยู่กับขนาดของโลหะแต่ละชนิดที่ทดสอบ และ ระยะทางที่ตรวจจับโลหะมีค่าเพิ่มขึ้นได้ เนื่องจากโลหะที่ถูกตรวจจับได้มีขนาดที่ใหญ่ขึ้นหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดที่ใช้งานมีค่าที่มากขึ้น

คำสำคัญ: วงจรเปิด/ปิดพัลส์ให้แก่ขดลวด, การโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์, ผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้า, การเหนี่ยวนำด้วยพัลส์, เครื่องตรวจจับโลหะ.

Abstract

This paper proposes a study of zero-crossing time response of coil current generated from each kind of metal by using pulse induction (PI). The goals of this research are as follows: 1) build an electronic circuit to on/off PWM (pulse width modulation) signal which passes a round coil and propagates toward a metal which are placed far away within 15 cm, 2) write an AVR ATmega168 microcontroller program to control the operation and generate PWM signals whose widths are varied so as to test and find out the characteristic of each kind of metal, 3) find out a technique for reading, storing, and analyzes the experimented results in order to construct many graphs which identify the falling edge time response of coil current generated from each metal, and 4) be a first guideline to build a metal detector in the future. The experimental results have been shown that both the coil driver and the microcontroller programming, proposed in this research, can be operated completely as desired and each metal has owned its zero-crossing time response of current on coil which is differentiated each other absolutely. A lot of response values of each metal at each distance are read successfully by microcontroller and are plotted many graphs. The tendencies of these graphs have the same direction. However, if the tested metal is far away until the Eddy current in that metal hardly can be received, the zero-crossing time differences of the current in the coil is nearly to be zero, i.e., the tested metal cannot be detected. Moreover, the testing distances are still relied on the size of each metal and the detectable distance is increased because the metal's size is bigger or the coil's diameter is larger.

Keywords: Coil Driver, Microcontroller Programming, Zero-Crossing Time Response of Coil Current, Pulse Induction, Metal Detector.

บทนำ

การเหนี่ยวนำด้วยพัลส์เป็นกระบวนการหนึ่งที่สำคัญที่นำมาใช้ในการสร้างเครื่องตรวจจับโลหะ (Metal Detector) จนทำให้เกิดคำเรียกรวมกันว่า “Pulse Induction Metal Detector” หลักการทำงานของการทำงานของการเหนี่ยวนำด้วยพัลส์ คือ พัลส์กระแสไฟฟ้าจะถูกส่งออกจากไปยังขดลวดส่ง หลังจากนั้นสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากพัลส์กระแสไฟฟ้าจะทำให้เกิด Eddy Current ในโลหะที่วางใกล้ๆ กับขดลวด ถ้าสนามแม่เหล็กถูกสวิตช์ได้ไวเพียงพอ Eddy Current ก็สามารรถที่จะถูกตรวจจับที่ขดลวดรับโดยกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงที่ขดลวดถูกนำมาใช้เพื่อบ่งบอกชนิดของโลหะได้

การออกแบบเครื่องตรวจจับโลหะโดยใช้หลักการเหนี่ยวนำด้วยพัลส์นั้นได้ถูกกล่าวถึงครั้งแรกในตำราต่างประเทศที่แต่งขึ้นโดย I. Grant, F.S. และ West, G.F. (1) ต่อมา J. A. Corbyn (2)(3) ได้พัฒนาและนำเสนอวงจรตรวจจับโลหะขึ้นมาใหม่ ซึ่งประกอบไปด้วยตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุและทรานซิสเตอร์เป็นจำนวนมาก ทำให้การทดสอบคุณสมบัติในการใช้งานนั้นกระทำได้อย่างมาก ต้องเสียเวลาปรับจูนแต่งมาก ก่อนที่จะใช้งานได้จริงและมีคุณสมบัติตามความต้องการ

ต่อจากนั้นได้มีนักวิจัยและบริษัทต่างๆ จากหลายประเทศจำนวนมากทำการวิจัยและพัฒนาเครื่องตรวจจับโลหะออกมาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเน้นไปที่การสร้างเพื่อจำหน่าย (4)(5) และเน้นจดสิทธิบัตรเพื่อขายลิขสิทธิ์ในการสร้างเครื่องตรวจจับโลหะ (6) ทำให้รายละเอียดการออกแบบ การสร้างและการทำงาน โดยเฉพาะวิธีการทดสอบก่อนการ

ใช้งานได้จริงได้ถูกเปิดเผยและเผยแพร่ออกมาในเชิงบทความและวารสารเชิงวิชาการน้อยมาก ซึ่งในที่นี้ อาจจะกล่าวได้ว่า แทบจะไม่มีใครทราบได้เลยว่าเครื่องตรวจจับโลหะมีหลักการออกแบบวงจรที่ใช้งานและมีวิธีทดสอบก่อนการใช้งานได้จริงอย่างไร ประเด็นที่ทราบมีเพียงข้อเดียว คือ วิธีการใช้งานเครื่องตรวจจับโลหะในทางปฏิบัติ เมื่อซื้อเครื่องตรวจจับโลหะจากผู้ผลิตหรือผู้จำหน่ายมาแล้วเท่านั้น ซึ่งแน่นอนที่สุด การใช้งานก็จะเป็นไปตามคำแนะนำการใช้เครื่องที่กำหนดตายตัวมาแล้วทั้งนั้น ไม่สามารถพัฒนาต่อไปได้ มีขอบเขตการใช้งานที่จำกัด และที่สำคัญต้องนำเข้าเครื่องตรวจจับโลหะจากผู้ผลิตหรือผู้จำหน่ายต่างประเทศเท่านั้น เนื่องจากการวิจัย ออกแบบและพัฒนาเครื่องตรวจจับโลหะดังกล่าวทำได้ยากและต้องผ่านการทดสอบใช้งานจริงเป็นเวลานาน จึงแทบจะไม่มีนักวิจัยท่านใดในประเทศไทยให้ความสนใจที่จะพัฒนาเครื่องตรวจจับโลหะขึ้นมาใช้งานเองหรือจำหน่ายในประเทศไทย

ดังนั้นจึงเกิดแนวความคิดที่จะทำการศึกษาและออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ใหม่เพื่อทำหน้าที่เปิด/ปิดวงจรพัลส์ที่จะส่งต่อไปแก่ขดลวดและเขียนโปรแกรมสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ขึ้นมาเพื่อสร้างสัญญาณ PWM ควบคุมการทำงาน รวมถึงจัดเก็บค่าระยะเวลาการลดลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดที่เกิดจากโลหะแต่ละชนิด โดยสัญญาณ PWM ที่ถูกสร้างขึ้นนี้มีค่าความกว้างพัลส์ของสัญญาณ PWM ด้านบวกมีค่าต่างๆ กัน ตั้งแต่ 3 หน่วยของไทเมอร์ 0 (คิดเป็น 9.636 ไมโครวินาที) ไปจนถึง 50 หน่วยของไทเมอร์ 0 (คิดเป็น 160.6 ไมโครวินาที) เพื่อที่จะทำให้รู้ได้ว่าโลหะ

แต่ละชนิดที่ทำการทดสอบมีผลตอบสนองต่อสัญญาณ PWM ที่มีค่าความกว้างของพัลส์ขนาดต่างๆ อย่างไร

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาการเหนี่ยวนำด้วยพัลส์โดยควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์แทนวงจรแอนะล็อก
2. เพื่อออกแบบและสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ที่ใช้ในการเปิด/ปิดสัญญาณ PWM ส่งผ่านขดลวดไปยังโลหะ
3. เพื่อเขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ให้สามารถควบคุมการทำงานและสร้างสัญญาณ PWM ได้
4. เพื่อหาวิธีในการอ่านค่าจัดเก็บค่าและวิเคราะห์ผลการทดสอบที่ได้รับของโลหะแต่ละชนิด
5. เพื่อเป็นแนวทางในการสร้างเครื่องตรวจจับโลหะในอนาคตต่อไป

ส่วนประกอบของระบบ

ในการทำวิจัยนี้ มีส่วนประกอบของระบบที่สำคัญ 2 ส่วน คือ ไมโครคอนโทรลเลอร์และวงจรเปิด/ปิดพัลส์ให้แก่ขดลวด ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ATmega168

ในที่นี้ บอร์ดสำเร็จรูป ET-EASY 168 STAMP (7) ซึ่งเป็นบอร์ดของบริษัท อีทีที จำกัด ถูกเลือกนำมาใช้งานเนื่องจากภายในบอร์ดบรรจุไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ATmega168 โดย ATmega168 นี้เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 บิตตระกูล AVR ของบริษัท Atmel ที่มีรูปร่างไอซีเป็นตัวยาวแบบ 32 TQFP

และทำงานที่ความถี่ของสัญญาณนาฬิกา 20 MHz มีขาพอร์ตอินพุต/เอาต์พุต มี GPIO ใช้งานจำนวน 22 บิต และมี Digital GPIO จำนวน 14 บิต มีไทมเมอร์/เคาน์เตอร์ใช้งานทั้งหมด 3 ตัว ได้แก่ ไทมเมอร์/เคาน์เตอร์ 0 และ 2 ที่ทำงานแบบ 8 บิต และไทมเมอร์/เคาน์เตอร์ 1 ที่ทำงานแบบ 16 บิต รวมถึงใช้งานอินเตอร์รัปต์ได้ทั้งแบบภายในและภายนอก โดยในงานวิจัยนี้จะใช้งานโมดูลและฟังก์ชันที่สำคัญ ดังนี้

1. ไทมเมอร์ 0 ใช้เพื่อสร้างสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) ซึ่งจะถูกส่งผ่านวงจรเปิด/ปิดพัลส์ แล้วส่งต่อไปยังขดลวด
2. ไทมเมอร์ 1 ใช้ตรวจจับผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์หรือระยะเวลาการลดลงของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่เกิดจากโลหะ ซึ่งเริ่มจับเวลาตั้งแต่กระแสไฟฟ้าเริ่มมีค่าลดลงไปจนถึงเวลาที่มีค่าเท่ากับ 0
3. ขาสัญญาณอินเตอร์รัปต์ 0 ใช้สั่งการให้ไทมเมอร์ 1 หยุดจับเวลา โดยถูกกำหนดโหมดการทำงานเป็นแบบขอบขาลง (Falling Edge)

ค่าความกว้างพัลส์ของสัญญาณ PWM ด้านบวกที่ถูกสร้างขึ้นนั้นมีค่าต่างๆ กันเป็นจำนวนเท่าของหน่วยของไทมเมอร์ 0 โดยมีค่าตั้งแต่ 3 หน่วยของไทมเมอร์ 0 (คิดเป็น 9.636 ไมโครวินาที) ไปจนถึง 50 หน่วยของไทมเมอร์ 0 (คิดเป็น 160.6 ไมโครวินาที) เนื่องจากโลหะแต่ละชนิดมีผลตอบสนองต่อสัญญาณ PWM ที่ค่าความกว้างของพัลส์แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลโดยตรงทำให้ผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่เกิดจากโลหะแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกันด้วย นอกจากนี้ ยังทำให้ทราบได้ว่าโลหะแต่ละชนิดมีผลตอบสนองเชิง

เวลาดำเนินการของกระแสไฟฟ้าในขดลวดเป็นอย่างไร โดยมีสมการที่ใช้ในการหาค่าความกว้างของสัญญาณพัลส์ PWM จากการใช้ AVR ATmega168 และใช้ Prescaler มีค่าเท่ากับ 64 (8) ดังแสดงในสมการที่ (1)

โดยในที่นี้ จะแบ่งสเกลออกเป็น 255 ส่วน (เนื่องจากใช้ไทมเมอร์ 0 ซึ่งเป็นวงจรรับ 8 บิต) ดังนั้นจะหาค่าความกว้างของสัญญาณพัลส์ PWM ที่ไทมเมอร์ 0 นับได้ โดยในที่นี้ จะขอแสดงค่าความกว้างของสัญญาณพัลส์ PWM อันดับแรก (3 หน่วยของไทมเมอร์ 0) และสัญญาณพัลส์ PWM อันดับสุดท้าย (50 หน่วยของไทมเมอร์ 0) เท่านั้น ดังแสดงในสมการที่ (2) กับ (3)

ระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าในขดลวดเริ่มลดลงจนเป็นศูนย์ (ผลตอบสนองเชิงเวลาตัด

ศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวด) ที่ถูกตรวจจับด้วยไทมเมอร์ 1 นั้นจะหาค่าได้จากการนำจำนวนสัญญาณนาฬิกาของพัลส์ที่รับได้คูณด้วย 50 ns (ไม่มี Prescaler) ดังแสดงในสมการที่ (4)

วงจรเปิด/ปิดพัลส์ให้แก่ขดลวดและหลักการ
ทำงานของวงจร

วงจรเปิด/ปิดพัลส์ (Coil Driver) ทำหน้าที่เปิดและปิดสัญญาณพัลส์ PWM ให้แก่ขดลวดและส่งผ่านผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่ตรวจจับได้จากโลหะแต่ละชนิดที่ทดสอบไปยังไม่ใครคอนโทรลเลอร์ โดยรูปวงจรที่นำเสนอเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ออกแบบขึ้นมาใหม่โดยอ้างอิงหลักการเหนี่ยวนำด้วยพัลส์และวิธีการใช้งานในทางปฏิบัติ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1

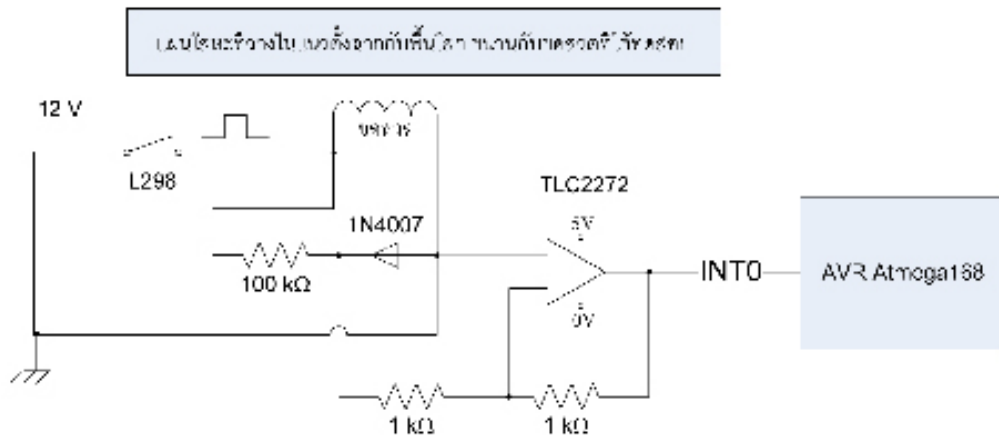
$$f_{PULSE} = 20 \text{ MHz} / (64 * 256) = 1.221 \text{ kHz}$$

$$\text{หรือ } T_{PULSE} = 1 / 1.221 \text{ kHz} = 8.192 * 10^{-4} \text{ s} \quad (1)$$

$$W_{3_PWM} = 3 / 255 * 8.192 * 10^{-4} = 9.636 \text{ } \mu\text{s} \quad (2)$$

$$W_{50_PWM} = 50 / 255 * 8.192 * 10^{-4} = 160.6 \text{ } \mu\text{s} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} T_{_discharge} &= \text{No. of CLKs} * 1 / 20 \text{ MHz} \\ &= \text{No. of CLKs} * 50 \text{ ns} \end{aligned} \quad (4)$$



รูปที่ 1 วงจรเปิด/ปิดพัลส์ให้แก่อุปกรณ์ (Coil Driver)

หลักการทำงานของวงจรมีดังนี้

1. เริ่มต้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะสร้าง

สัญญาณ PWM โดยใช้ไทเมอร์ 0 ไปกระตุ้นให้ทรานซิสเตอร์ L298 ทำงานในสภาวะปิดวงจร (สับสวิตซ์ลง) ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจะไหลผ่านวงจรให้แก่อุปกรณ์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง

2. เมื่อไทเมอร์สร้างพัลส์ของสัญญาณ

PWM ด้านบวกเสร็จสิ้นตามค่าความกว้างพัลส์บวกที่กำหนด ใน ณ ขณะนั้น ทรานซิสเตอร์จะทำงานในสภาวะเปิดวงจร (สับสวิตซ์ขึ้น) นั่นคือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดหรือวงจรจะเริ่มลดลงไปเรื่อยๆ จนกระทั่งกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดมีค่าเท่ากับ 0

3. ในขณะที่กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขด

ลวดเริ่มมีค่าลดลง ไมโครคอนโทรลเลอร์จะเริ่มสั่งการให้ไทเมอร์ 1 ทำการจับระยะเวลาการลดลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด ซึ่งเริ่มจับเวลาตั้งแต่กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดเริ่มมีค่าลดลงไปจนถึงเวลาที่กระแสไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 0

4. เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดมีค่า

เท่ากับ 0 จะทำให้เอาต์พุตของวงจรที่ต่ออยู่กับขาพอร์ตอินเตอร์รัปต์ 0 ของไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงาน (ในที่นี้ กำหนดโหมดทำงานของสัญญาณอินเตอร์รัปต์เป็นแบบขอบขาสูง) ซึ่งจะไปสั่งการให้ไทเมอร์ 1 หยุดจับเวลา

5. หลังจากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะ

ทำการบันทึกค่าระยะเวลาการลดลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด

นอกจากนี้อ้างอิงงานวิจัย (9) พบว่า

ถึงแม้ว่าขนาดและรูปร่างทางกายภาพของขดลวดจะแตกต่างกันไปในการใช้งาน แต่ค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) ของขดลวดแต่ละแบบนั้นก็มีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งโดยทั่วไป ค่าความเหนี่ยวนำที่เหมาะสมและเป็นที่ยอมรับใช้งานในเครื่องตรวจจับโลหะที่ใช้หลักการการเหนี่ยวนำด้วยพัลส์จะมีค่าอยู่ระหว่าง 300-500 μH และขดลวดที่มีขนาดเล็กกว่า ย่อมจะต้องมีจำนวนรอบของขดลวดที่มากขึ้นด้วย ซึ่งในงานวิจัย (9) นี้ได้เลือกใช้ค่า

ความเหนียวของขดลวดมีค่าเท่ากับ 400 μH ดังนั้น ในงานวิจัยที่นำเสนอจะเลือกใช้ขดลวดรูปวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 15 ซม. ที่มีจำนวนรอบเท่ากับ 35 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.40 มม. เช่นเดียวกับงานวิจัย (9) โดยจากการวัดค่าความเหนียวและค่าความต้านทานของขดลวดที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้ พบว่า มีค่าความเหนียวเท่ากับ 420 μH และมีค่าความต้านทานเท่ากับ 2.2 โอห์ม

ผลการทดสอบ

ในการทดสอบจะนำโลหะ 3 ชนิด ได้แก่ แผ่นอลูมิเนียม แผ่นทองแดง และแผ่นเหล็ก ที่มีพื้นที่แตกต่างกัน 2 ค่า คือ ขนาด 2x2 ตารางนิ้ว และ ขนาด 4x4 ตารางนิ้ว มาทำการทดสอบหาค่าผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่เกิดขึ้นจากโลหะชนิดนั้นๆ โดยในที่นี้ ระบายของแผ่นโลหะและระบายของขดลวดวางในแนวตั้งฉากกับระบายของพื้นโลก และ ในการทดสอบแต่ละครั้งจะต้องทำการตั้งค่าค่าเริ่มต้นก่อน โดยจะเริ่มต้นจากการทดสอบชิ้นงานในสถานะที่ไม่มีโลหะที่จะตรวจจับ เนื่องจากแต่ละบริเวณที่ทำการทดสอบได้รับผลกระทบเนื่องจากสนามแม่เหล็กโลกที่ไม่เท่ากัน ระยะเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวด ($T_{\text{discharge}}$) เมื่อไม่มีโลหะ (ทดสอบกับอากาศ) จะทำหน้าที่เสมือนเป็นค่าขีดเริ่ม (Threshold) ที่ใช้เปรียบเทียบกับค่าระยะเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดเมื่อมีโลหะที่ทำการทดสอบ ณ ระยะเวลาห่างค่าต่างๆ กันที่มีค่าตั้งแต่ 1-15 ซม. โดยในที่นี้

กราฟผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่ได้จากการทดสอบจะถูกพล็อตออกมาดังแสดงในรูปที่ 2 – 7 ซึ่งแกน x คือค่าความกว้างของพัลส์ PWM ด้านบวก ในหน่วยไมโครวินาที และแกน y คือค่าผลต่างของระยะเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดเมื่อไม่มีโลหะกับระยะเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดเมื่อมีโลหะ ในหน่วยนาโนวินาที ดังแสดงในสมการดังนี้

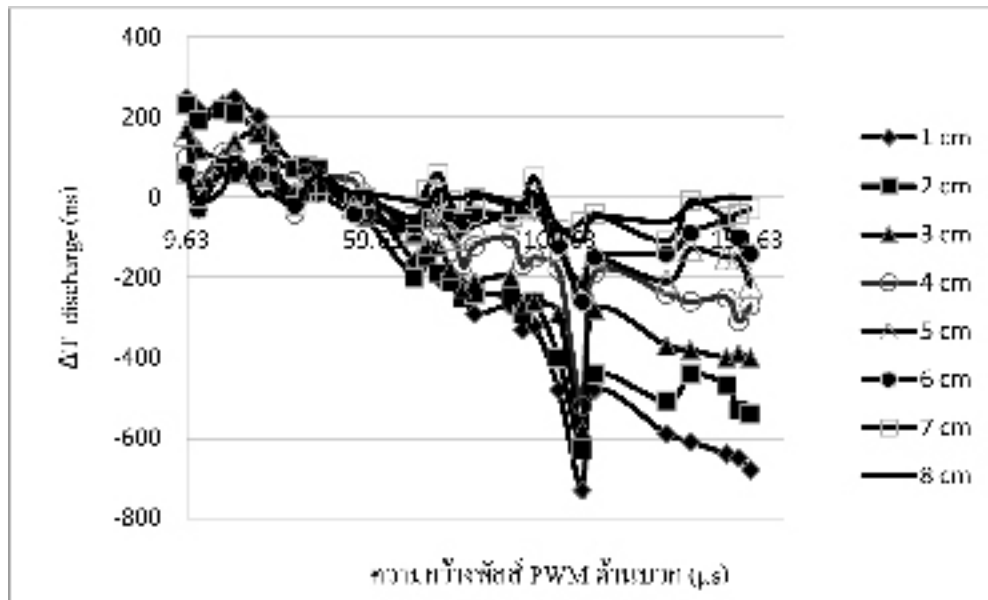
ซึ่งในที่นี้จะขอแสดงรูปภาพผลตอบ

สนองเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่เกิดจากโลหะแต่ละชนิดที่ตรวจจับได้เท่านั้น เนื่องจากจำนวนหน้าของบทความวิจัยมีจำนวนจำกัด โดยรูปภาพผลตอบสนองเหล่านี้จะถูกอธิบายและวิเคราะห์ผลการทดสอบได้ดังนี้

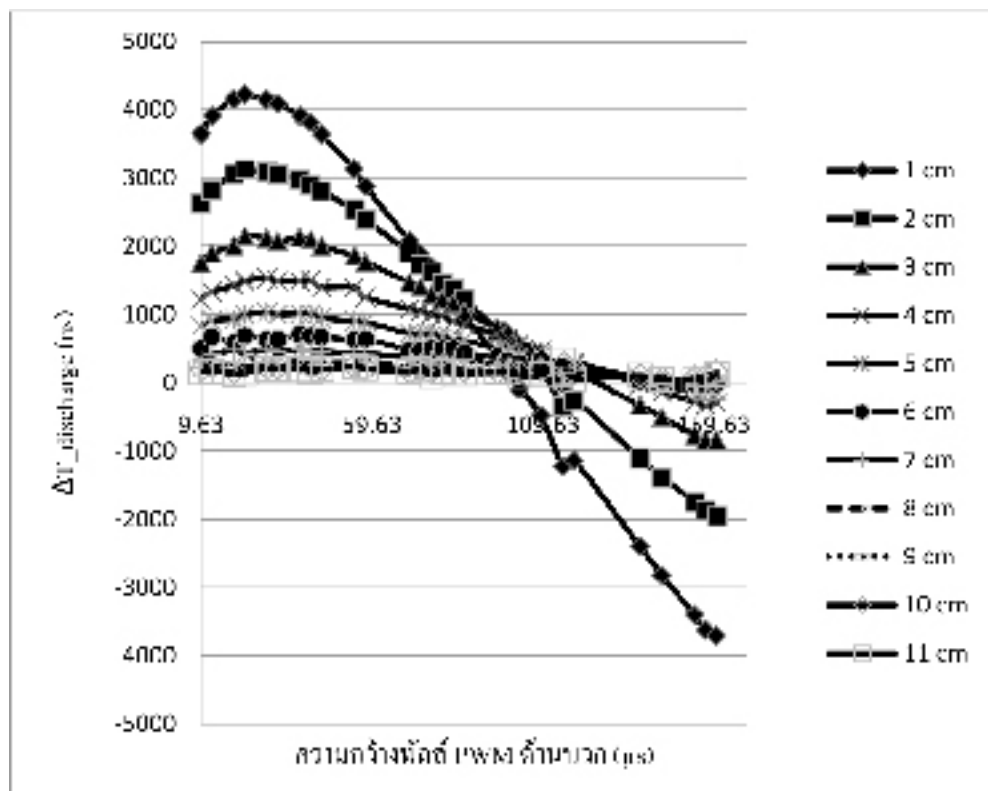
อ้างถึงรูปที่ 2 ผลการทดสอบที่เกิดขึ้น

กับแผ่นอลูมิเนียมขนาด 2*2 ตารางนิ้ว พบว่าระยะทางไกลสุดที่ตรวจจับโลหะได้มีค่าเท่ากับ 8 ซม. โดยค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ (แกน y) จะมีค่าเปลี่ยนแปลงจากบวกเป็นลบและมีความชันเป็นลบ เมื่อความกว้างพัลส์มีค่าเพิ่มขึ้น โดยในช่วงที่ค่าความกว้างพัลส์มีค่าโดยประมาณ น้อยกว่า 48.19 ไมโครวินาที (15 หน่วยของไทมเมอร์ 0) ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ จะมีค่าเป็นบวก แต่เมื่อค่าความกว้างพัลส์มีค่ามากกว่า 48.19 ไมโครวินาทีขึ้นไปค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ที่ได้กลับมีค่าเป็นลบ นอกจากนี้ ระยะตรวจจับได้เท่ากับ 1 ซม. ให้ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ที่เป็นค่าบวกที่มากที่สุด (Upper Bound) แต่จะให้ค่า $\Delta T_{\text{discharge}}$ ที่เป็นค่าลบที่มีค่าน้อยที่สุด (Lower Bound)

$$\Delta T_{\text{discharge}} = T_{\text{discharge}}_{\text{air}} - T_{\text{discharge}}_{\text{metal}} \quad (5)$$



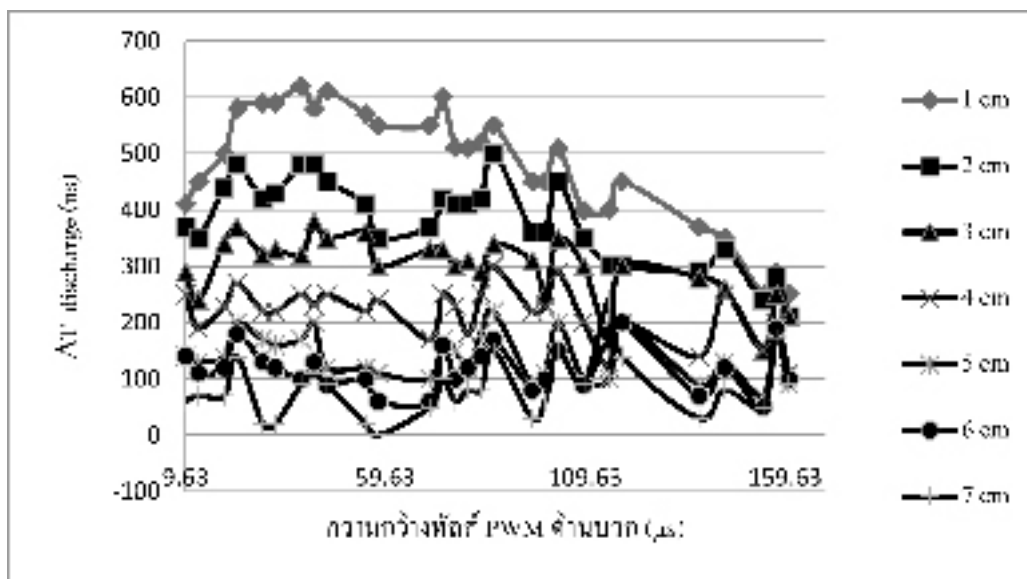
รูปที่ 2 ผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากอลูมิเนียมขนาด 2x2 นิ้ว² ที่วัดได้



รูปที่ 3 ผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากอลูมิเนียมขนาด 4x4 นิ้ว² ที่วัดได้

อ้างถึงรูปที่ 3 ผลการทดสอบที่เกิดขึ้นกับแผ่นอลูมิเนียมขนาด 4x4 นิ้ว พบว่า ระยะทางไกลสุดที่ตรวจจับโลหะได้มีค่าเท่ากับ 11 ซม. โดยค่า $\Delta T_{discharge}$ มีลักษณะเป็นรูปตัวยูคว่ำในช่วงที่ค่าความกว้างพัลส์มีค่าน้อยกว่า 48.19 ไมโครวินาที (15 หน่วยของไทเมอร์ 0) โดยจุดสูงสุดอยู่ที่ค่าความกว้างพัลส์ มีค่าเท่ากับ 25.7 ไมโครวินาที (8 หน่วยของไทเมอร์ 0) หลังจากนั้น ค่า $\Delta T_{discharge}$ ที่ได้รับจะมีค่าเปลี่ยนแปลงลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยที่ระยะตรวจจับได้เท่ากับ 1 ซม. จะให้ค่า $\Delta T_{discharge}$ ที่เป็นบวกมากที่สุด แต่จะให้

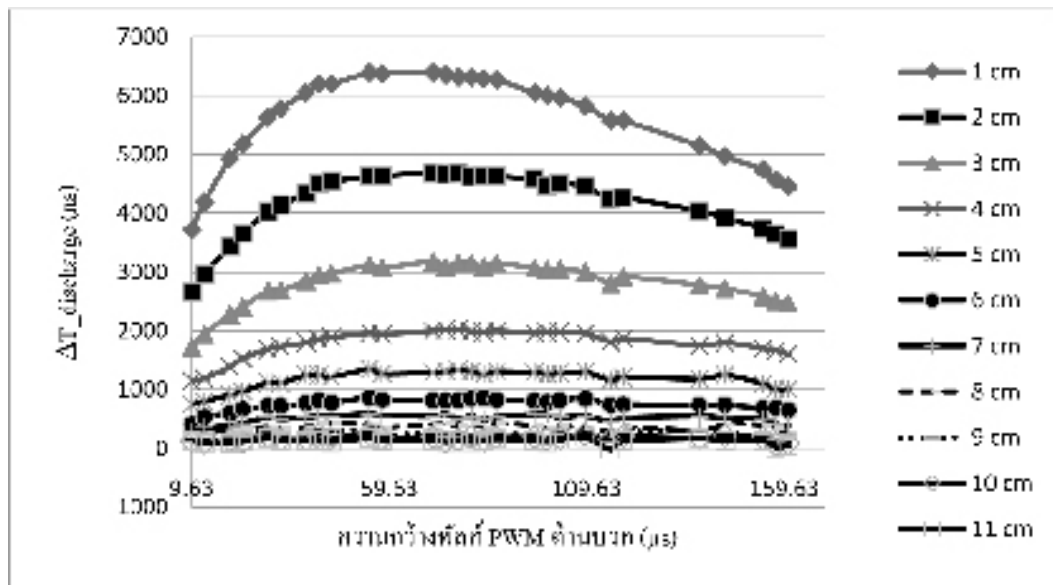
ค่า $\Delta T_{discharge}$ ที่เป็นลบน้อยที่สุด เช่นเดียวกับผลที่ได้รับจากแผ่นอลูมิเนียมขนาด 2x2 นิ้ว นอกจากนี้ เมื่อระยะตรวจจับได้มีค่าอยู่ระหว่าง 9 - 11 ซม. และค่าความกว้างพัลส์มีค่าน้อยกว่า 128.5 ไมโครวินาที (40 หน่วยของไทเมอร์ 0) จะได้ค่า $\Delta T_{discharge}$ ที่มีค่ามากกว่าศูนย์เพียงเล็กน้อยและใกล้เคียงกัน และเมื่อระยะตรวจจับได้มีค่าอยู่ระหว่าง 5 - 11 ซม. และความกว้างพัลส์มีค่ามากกว่า 128.5 ไมโครวินาที จะได้ค่า มีค่า $\Delta T_{discharge}$ เกือบจะเป็นศูนย์



รูปที่ 4 ผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากทองแดงขนาด 2x2 นิ้ว ที่วัดได้

อ้างอิงรูปที่ 4 ผลการทดสอบที่เกิดขึ้นกับแผ่นทองแดงขนาด 2x2 นิ้ว พบว่า ระยะทางไกลสุดที่ตรวจจบลโลหะได้มีค่าเท่ากับ 7 ซม. โดยค่า $\Delta T_{discharge}$ มีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นลงตลอดเวลาและมีค่าเป็นบวกทุกๆ ค่า ความกว้างพัลส์ โดยระยะตรวจจบลได้เท่ากับ

1 ซม. จะให้ค่า $\Delta T_{discharge}$ ที่มากที่สุด ทุกๆ ค่า ส่วนระยะตรวจจบลได้เท่ากับ 7 ซม. จะให้ค่า $\Delta T_{discharge}$ ที่น้อยที่สุดเกือบทุกค่า กล่าวคือ เมื่อระยะตรวจจบลได้มีค่ามากขึ้น ค่า $\Delta T_{discharge}$ ที่ได้รับจะมีค่าที่ลดลง



รูปที่ 5 ผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากทองแดงขนาด 4x4 นิ้ว ที่วัดได้

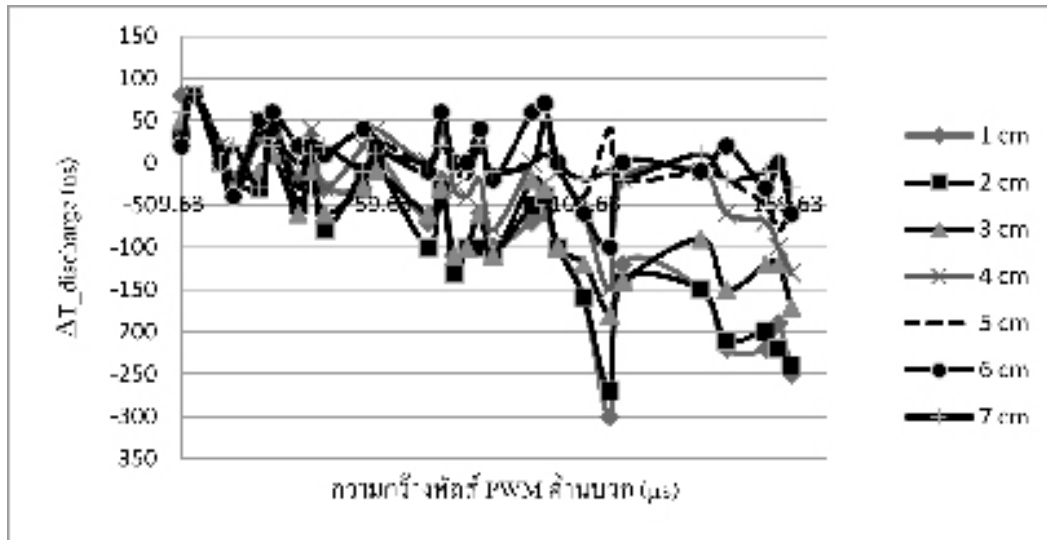
อ้างอิงรูปที่ 5 ผลการทดสอบที่เกิดขึ้นกับแผ่นทองแดงขนาด 4x4 นิ้ว พบว่า ระยะทางไกลสุดที่ตรวจจบลโลหะได้มีค่าเท่ากับ 11 ซม. โดยค่า $\Delta T_{discharge}$ มีค่าเป็นบวกทุกๆ ค่า โดยมีลักษณะเป็นรูปตัวยูคว่ำและมีจุดสูงสุดอยู่ที่ค่าความกว้างพัลส์เท่ากับ 64.25 ไมโครวินาที (20 หน่วยของไทมเมอร์ 0) ซึ่งเส้นกราฟที่ได้รับมีความแตกต่างจากเส้นกราฟที่เกิดขึ้นกับแผ่นทองแดงขนาด 2x2 นิ้ว อย่างชัดเจน นอกจากนี้ ระยะตรวจจบลได้เท่ากับ 1 ซม. ยังคงให้ค่า $\Delta T_{discharge}$ ที่มากที่สุดทุกๆ

ค่า ส่วนระยะตรวจจบลได้ตั้งแต่ 7 ซม. ขึ้นไป จะให้ค่า $\Delta T_{discharge}$ ที่น้อยที่สุดเกือบจะมีค่าเป็นศูนย์และมีค่าใกล้เคียงกันเช่นเดียวกับผลที่ได้รับจากแผ่นทองแดงขนาด 2x2 นิ้ว

อ้างอิงรูปที่ 6 ผลการทดสอบที่เกิดขึ้นกับแผ่นเหล็กขนาด 2x2 นิ้ว พบว่า ระยะทางไกลสุดที่ตรวจจบลโลหะได้มีค่าเท่ากับ 7 ซม. ค่า $\Delta T_{discharge}$ มีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นลงตลอดเวลา มีทั้งค่าบวกและลบ โดยในช่วงที่ค่าความกว้างพัลส์มีค่าน้อยกว่า 48.19 ไมโครวินาที (15 หน่วยของไทมเมอร์ 0) ที่ระยะตรวจ

จับได้ค่าใดๆ ก็ตามจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก แต่หลังจากที่ค่าความกว้างพัลส์มีค่ามากกว่า 48.19 ไมโครวินาที ค่า $\Delta T_{discharge}$ ที่ได้รับ จะมีแตกต่างกันมาก โดยระยะตรวจจับได้

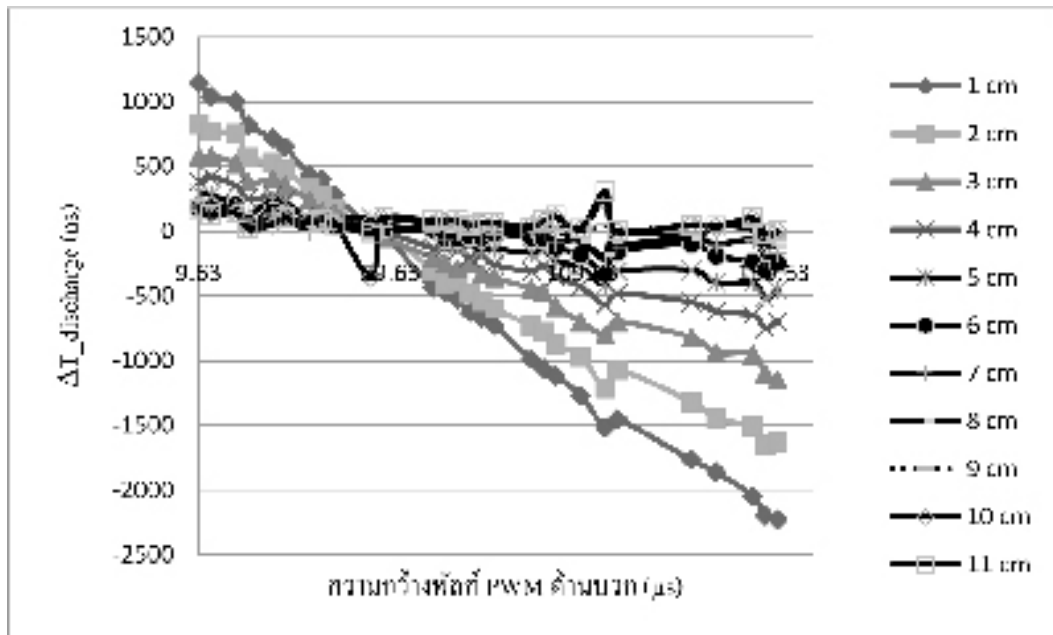
เท่ากับ 7 ซม. จะให้ค่า $\Delta T_{discharge}$ ที่มากที่สุด แต่ระยะตรวจจับได้เท่ากับ 1 ซม. จะให้ค่า $\Delta T_{discharge}$ ที่น้อยที่สุด



รูปที่ 6 ผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากเหล็กขนาด 2x2 นิ้ว ที่วัดได้

อ้างอิงรูปที่ 7 ผลการทดสอบที่เกิดขึ้น กับแผ่นเหล็กขนาด 4x4 นิ้ว พบว่า กราฟ ผลตอบสนองที่ได้รับจะมีลักษณะที่คล้ายกับกราฟของแผ่นอลูมิเนียม กล่าวคือ ค่า $\Delta T_{discharge}$ มีการเปลี่ยนแปลงจากบวกเป็นลบและความชันเป็นลบมากขึ้น โดยในช่วงที่ค่าความกว้างพัลส์มีค่าโดยประมาณน้อยกว่า

57.83 ไมโครวินาที (18 หน่วยของไทเมอร์ 0) ค่า $\Delta T_{discharge}$ จะมีค่าเป็นบวก และตั้งแต่ค่าความกว้างพัลส์มีค่ามากกว่า 57.83 ไมโครวินาที ขึ้นไป ค่า $\Delta T_{discharge}$ ที่ได้กลับมีค่าเป็นลบ อีกทั้งระยะตรวจจับได้ระหว่าง 8 - 11 ซม. ค่า $\Delta T_{discharge}$ ที่ได้ รับจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์



รูปที่ 7 ผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากเหล็กขนาด 4x4 นิ้ว² ที่วัดได้

สรุปผลการวิจัย

จากการทำวิจัยในครั้งนี้พบว่าวงจรเปิด/ปิดพัลส์ PWM ให้แก่ขดลวดที่ออกแบบและสร้างขึ้นใหม่นี้ สามารถส่งสัญญาณพัลส์ PWM ไปยังโลหะและตรวจจับ Eddy Current ที่เกิดขึ้นในโลหะได้ โดยในเบื้องต้น จะทำการทดสอบโลหะ 3 ชนิดเท่านั้น ได้แก่ อลูมิเนียม ทองแดง และเหล็ก อีกทั้งไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ATmega168 สามารถทำงานตามต้องการและสร้างสัญญาณพัลส์ PWM ที่มีค่าความกว้างของพัลส์ด้านบวกต่างๆ กันได้เป็นอย่างดี โดยในงานวิจัยนี้เลือกอ่านค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำแนกคุณลักษณะของโลหะจากการใช้หลักการเหนี่ยวนำด้วยพัลส์โดยใช้ค่าผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่เกิดจากโลหะแต่ละชนิด หลังจากนั้นได้

ทำการจัดเก็บค่าและวิเคราะห์ผลการทดสอบที่ได้รับ เพื่อสร้างกราฟผลตอบสนองดังกล่าว ซึ่งจากการทดสอบ พบว่า โลหะแต่ละชนิดให้เส้นกราฟผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่แตกต่างกันโดยสิ้นเชิง ซึ่งกราฟผลตอบสนองของโลหะเหล่านี้ล้วนแล้วแต่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน สัญญาณพัลส์ PWM ที่สร้างขึ้นสามารถส่งออกไปและตรวจจับโลหะแต่ละชนิดได้ในระยะทางไกลสุดเท่ากับ 7 - 8 ซม. และ 11 ซม.สำหรับโลหะขนาด 2x2 นิ้ว² และขนาด 4x4 นิ้ว² ตามลำดับ โดยกราฟผลตอบสนองของแผ่นเหล็กจะมีลักษณะที่คล้ายกับกราฟผลตอบสนองของแผ่นอลูมิเนียม กล่าวคือ เมื่อค่าความกว้างของพัลส์มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จาก 9.636 - 160.6

ไมโครวินาที พบว่า ค่า $\Delta T_{discharge}$ มีการเปลี่ยนแปลงจากบวกเป็นลบและความชันเป็นลบมากขึ้น แต่ทั้งนี้ ค่าบวกและลบของค่า $\Delta T_{discharge}$ ที่ได้รับจากแผ่นเหล็กจะมีค่าที่สูงกว่าและต่ำกว่าค่า $\Delta T_{discharge}$ ของแผ่นอลูมิเนียม ตามลำดับ ส่วนกราฟผลตอบแทนของแผ่นทองแดงจะให้ค่า $\Delta T_{discharge}$ ที่เป็นบวกเท่านั้น มีค่าสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นอลูมิเนียมและแผ่นเหล็ก และเมื่อระยะ ตรวจจับได้มีค่าไกลออกไปมากขึ้นเท่าใด ค่า $\Delta T_{discharge}$ ที่ได้รับจากแผ่นทองแดงก็จะยิ่งมีค่าเข้าใกล้ศูนย์มากขึ้นเท่านั้น นั่นคือ ขดลวดไม่สามารถจะรับ Eddy Current ที่เกิดขึ้นในโลหะได้ นอกจากนี้ ระยะห่างในการทดสอบยังขึ้นอยู่กับขนาดของโลหะแต่ละชนิดที่ทดสอบด้วย และ ยิ่งถ้าขนาดของโลหะและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดที่ใช้งานมีค่ามากขึ้นเท่าใด ระยะทางที่ตรวจจับโลหะได้ก็มีระยะทางที่ไกลมากขึ้นเท่านั้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณผู้อ่านบทความทุกท่านที่ให้ความรู้และข้อเสนอแนะที่มีประโยชน์รวมถึง นายจตุรงค์ บุริสาร นักศึกษาปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต ที่ให้การช่วยเหลือและคำแนะนำ จนทำให้งานวิจัยนี้เสร็จลุล่วง

ข้อเสนอแนะสำหรับการทำวิจัยในอนาคต

ผลงานที่ได้รับจากการทำวิจัยในครั้งนี้

คือ วงจรเปิด/พัลส์สัญญาณ PWM ให้แก่ขดลวดที่ทำหน้าที่ส่งผ่านและตรวจจับ Eddy Current ที่เกิดขึ้นจากโลหะ 3 ชนิด ได้แก่ อลูมิเนียม ทองแดง และเหล็ก, โปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ATmega168 ที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานและสร้างสัญญาณพัลส์ PWM รวมไปถึงวิธีที่ใช้ในการอ่านและบันทึกค่าเพื่อนำไปสร้างกราฟผลตอบแทนเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่เกิดขึ้นจากโลหะแต่ละชนิด ดังนั้น งานวิจัยต่อไปที่ควรจะทำเพิ่มเติมในช่วงเริ่มต้นต่อไป คือ การนำค่าข้อมูลหรือกราฟผลตอบแทนเหล่านี้ไปสร้างสมการคุณลักษณะ (Characteristic Equations) ของโลหะทั้ง 3 ชนิดและการสร้างเครื่องตรวจจับโลหะของประเทศไทยในอนาคตได้จริง เพื่อเป็นการออกแบบ การทำวิจัยและการพัฒนาเทคโนโลยีของประเทศไทยเอง ลดค่าใช้จ่ายการนำเข้าอุปกรณ์และวงจรใช้งานที่เกี่ยวข้องจากต่างประเทศที่มีราคาแพง

เอกสารอ้างอิง

- (1) I. Grant, F. S. and West, G. F. (1965) **Interpretation Theory in Applied Geophysics** McGraw-Hill.
- (2) J. A. Corbyn (1980) "Pulse Induction Metal Detector" **Wireless World**.
- (3) J. A. Corbyn (1980) "Pulse Induction Metal Detector - 2" **Wireless World**. pp.1-3.
- (4) DeepTech Metal Detectors "MEGAPULSE III - Pulse Induction Metal Detector" from <http://www.deeptech-bg.com/megapulseIII/MegapulseIII.pdf>
- (5) DeepTech Metal Detectors (2007). "Coil and Search Head Design – Patents and Utility Models (Part 1)" from www.deeptech-bg.com/search_coils.pdf
- (6) Patents of Metal Detector from <http://www.freepatentsonline.com/D356044.html>
- (7) คู่มือการใช้งานบอร์ด ET-EASY168 STAMP, บริษัท อีทีที จำกัด.
- (8) ประจัน พลังสันติกุล, "C Programming for AVR Microcontroller and WINAVR (C Compiler) - การเขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ด้วยภาษา C กับ WinAVR," พิมพ์ครั้งที่ 1, บริษัท แอพซอพท์เทค จำกัด.
- (9) Pulse induction metal detector with DSP from http://www.lammerbries.nl/electronics/PI_metal_detector.html

