การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 48
The 48th Electrical Engineering Conference (EECON-48)
วันที่ 19-21 พฤศจิกายน 2568 ณ โรงแรมฟูราม่า จังหวัดเชียงใหม่

ตัวควบคุมความเร็วรอบสปินเดิลของเครื่องกัดซีเอ็นซี สำหรับรักษาแรงกัดคงที่

Spindle Speed Controller of CNC Milling Machine for Maintaining Constant Cutting Force

อดิศักดิ์ แข็งสาริกิจ[1*], โกวิท พิเภก[1], และ สุธี รุกขพันธุ์[1]
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ adisak.kha@rmutr.ac.th[*]

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาตัวควบคุมความเร็วรอบสปินเดิลของเครื่องกัดซีเอ็นซี เพื่อรักษาแรงกัดให้อยู่ในระดับคงที่ โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแรงกัด และใช้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมอเตอร์แกนกับแรงกัดเป็นสัญญาณป้อนกลับเข้าสู่ตัวควบคุม ความเร็วรอบสปินเดิลถูกปรับเปลี่ยนแบบเรียลไทม์ตามค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น การทดลองกัดชิ้นงานเหล็กกล้าเปรียบเทียบแรงกัดจริงกับค่าเป้าหมาย พบว่าตัวควบคุมสามารถรักษาแรงกัดให้อยู่ในค่าที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้อายุการใช้งานของดอกกัดยาวนานขึ้น และมีศักยภาพต่อการประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมจริง

คำสำคัญ: แรงกัด, ความเร็วรอบสปินเดิล, เครื่องกัดซีเอ็นซี, ระบบขับเคลื่อนแกน

Abstract

This paper presents the design and development of a spindle speed controller for CNC milling machines to maintain constant cutting force. A mathematical model of the cutting force was established, and the relationship between the axis motor current and the cutting force was employed as a feedback signal. The spindle speed was adjusted in real time according to the control error. Experimental tests were performed on steel workpieces, comparing the measured cutting force with the target value. The results demonstrated that the proposed controller effectively maintained the cutting force, extended tool life, and showed potential for practical applications in machining processes.

Keywords: Cutting force, Spindle Speed, CNC milling machine, Feed drive system

1. บทนำ

อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนโลหะและการขึ้นรูปโลหะส่วนใหญ่ใช้เครื่องกัดซีเอ็นซี (CNC Milling Machine) เป็นเครื่องจักรหลักในกระบวนการผลิต เนื่องจากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพ ลดการสูญเสีย และลดเวลาการผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม เป้าหมายเหล่านี้มักสวนทางกับการสึกหรอของดอกกัด (Tool Life) [1] โดยหากเพิ่มความเร็วตัด (Cutting Speed) [1,2] จะทำให้ดอกกัดสึกหรอเร็วขึ้น ส่งผลให้ความถูกต้องและความแม่นยำของการผลิตลดลง และหากเพิ่มความเร็วมากเกินไป อาจก่อให้เกิดการแตกหักของดอกกัด (Tool Breakage) [1–3] ซึ่งเป็นสาเหตุของการหยุดทำงาน และส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น

แรงกัด (Cutting Force) [1–5] ถือเป็นตัวแปรสำคัญที่สะท้อนทั้งอายุการใช้งานของดอกกัด และคุณภาพผิวของชิ้นงาน หากแรงกัดสูงเกินไปจะทำให้ดอกกัดสึกหรอ หรือแตกหักง่าย ในขณะที่แรงกัดต่ำเกินไปย่อมทำให้ประสิทธิภาพการกัดลดลง ดังนั้นการควบคุมแรงกัดให้อยู่ในระดับเหมาะสม จึงเป็นประเด็นสำคัญของการตัดเฉือนด้วยเครื่องกัดซีเอ็นซี ที่ผ่านมา งานวิจัยจำนวนมากได้เสนอแนวทางการควบคุมแรงกัด [6–8] โดยอาศัยการตรวจวัดด้วยไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) และป้อนข้อมูลกลับเข้าสู่ตัวควบคุม แม้จะมีความแม่นยำสูง แต่อุปกรณ์ดังกล่าวมีข้อจำกัดด้านราคา ขนาดการติดตั้ง และความไม่ยืดหยุ่นต่อการใช้งานจริงในโรงงานอุตสาหกรรม

จากข้อจำกัดดังกล่าว แนวคิดการออกแบบตัวควบคุมความเร็วรอบสปินเดิล จึงถูกนำมาใช้ โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างแรงกัดกับกระแสมอเตอร์ของระบบขับเคลื่อนแกน แทนการใช้ไดนาโมมิเตอร์ ทั้งนี้แรงกัดเป้าหมายจะถูกกำหนดจากคุณสมบัติของวัสดุ ความเร็วป้อน และความเร็วสปินเดิล จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับค่าแรงกัดที่ได้จากกระแสมอเตอร์ เพื่อหาความคลาดเคลื่อน และนำไปคำนวณด้วยกฎการควบคุม ทำให้สามารถปรับความเร็วรอบสปินเดิลแบบเรียลไทม์ ซึ่งผลการทดลองสามารถรักษาแรงกัดให้อยู่ในค่าที่เหมาะสม และส่งผลให้อายุการใช้งานของดอกกัดยาวนานขึ้น

2. แรงกัดเครื่องกัดซีเอ็นซี

2.1 แรงกัด

แรงกัดคือแรงที่เกิดขึ้นจากการตัดเฉือนวัสดุ ด้วยเครื่องมือตัดที่มีหลายฟัน โดยเครื่องมือนั้น หมุนรอบตัวเองในขณะที่ชิ้นงานถูกป้อนผ่านคมตัดของดอกกัด แต่ละคมตัดจะสัมผัสชิ้นงานเป็นช่วง ๆ ทำให้เกิดเศษวัสดุหรือที่เรียกว่าชิป (chip) ซึ่งปริมาณชิปและสภาพการตัดขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์สำคัญ ได้แก่ ความเร็วรอบสปินเดิล อัตราป้อนความลึก และความกว้างตัด สามารถอธิบายได้จากสมการที่ 1 ดังนี้

$$F_C = k_C \cdot A \tag{1}$$

โดยที่

F_C เท่ากับแรงกัด (N)

k_C เท่ากับการตัด (N/mm²)

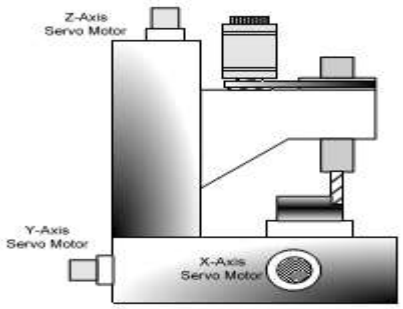
A เท่ากับพื้นที่หน้าตัดของเศษชิป (mm²)

ฉะนั้นแรงกัดเพิ่มขึ้น หรือลดลงเกินค่าที่เหมาะสม จะทำให้ดอกกัดสึกหรอเร็วขึ้น หรือแตกหักได้ ดังนั้นการควบคุมแรงกัดให้อยู่ในช่วงที่

เหมาะสม จึงเป็นปัจจัยสำคัญในการยืดอายุการใช้งานของดอกกัดและคุณภาพชิ้นงาน แรงกัดยังสามารถใช้กระแสมอเตอร์ของสปินเดิล หรือกระแสมอเตอร์แกน ในการประมาณค่าแรงกัดได้ เนื่องจากแรงที่ต้านการตัดเฉือนจะแปรผันโดยตรงกับโหลดที่มอเตอร์

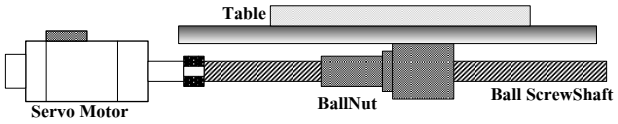
2.2 โครงสร้างพื้นฐานเครื่องกัดซีเอ็นซี

โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องกัดซีเอ็นซี ประกอบด้วยระบบขับเคลื่อนแกน 3 แกนเท่ากับ แกน X-Y-Z และหัวสปินเดิล ดังรูปที่ 1 ส่วนระบบขับเคลื่อนแกนประกอบด้วยเซอร์โวมอเตอร์ บอลสกรู บอลนัท คัพปลิ้ง และโต๊ะจับยึดชิ้นงานดังรูปที่ 2 การทำงานของเครื่องกัดซีเอ็นซีจะทำงานตามโปรแกรมจะสั่งงานให้ระบบขับเคลื่อนแกนแต่ละแกนทำงานตามคำสั่งที่เขียนไว้ในโปรแกรมกัดชิ้นงาน การใช้งานเครื่องกัดซีเอ็นซีทั่วไป



รูปที่ 1 โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องกัดซีเอ็นซี

ชิ้นงานจะถูกจับยึดชิ้นงานอยู่บนโต๊ะจับยึดชิ้นงาน ต่อจากนั้นชิ้นงานจะเคลื่อนที่เข้าหาดอกกัดที่หมุนอยู่ ตามคำสั่งโปรแกรมชิ้นงาน ส่งผลให้เกิดการตัดเฉือนชิ้นงาน การตัดฉือนชิ้นงานนี้ถูกเรียกว่าแรงกัด และสามารถกำหนดสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแรงกัด [x] ได้ดังสมการที่ 2



รูปที่ 2 ส่วนประกอบของระบบขับเคลื่อนแกน

$$J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + Tc = K_t I \quad (2)$$

โดยที่

J เท่ากับโมเมนท์ความเฉื่อย
B เท่ากับแดมปิ้ง
θ เท่ากับค่าตำแหน่งเชิงมุม
$\dot{\theta}$ เท่ากับค่าความเร็วเชิงมุม
$\ddot{\theta}$ เท่ากับค่าความเร่งเชิงมุม
K_t เท่ากับค่าคงที่ของดีซีมอเตอร์
Tc เท่ากับค่าแรงบิดกัด (Cutting Torque)
I เท่ากับค่ากระแสขณะดอกกัดยังไม่ได้กัดชิ้นงาน

2.3 การประมาณค่าแรงกัด

การประมาณค่าแรงกัดแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ช่วงคือช่วงที่ดอกกัดยังไม่ได้กัดชิ้นงาน (Air cut) และช่วงที่ดอกกัดกำลังกัดชิ้นงาน (Cutting) สามารถกำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ ได้ดังนี้คือ

ช่วงที่ดอกกัดยังไม่ได้กัดชิ้นงาน

$$J_o\ddot{\theta} + B_o\dot{\theta} = K_t I_o \quad (3)$$

ช่วงที่ดอกกัดกำลังกัดชิ้นงาน

$$J_c\ddot{\theta} + B_c\dot{\theta} + Tc = K_t I_c \quad (4)$$

หมายเหตุ *ตัวห้อย o เท่ากับคือตัวแปรช่วงที่ดอกกัดยังไม่ได้กัดชิ้นงาน และตัวห้อย c เท่ากับตัวแปรช่วงที่ดอกกัดกัดชิ้นงาน*

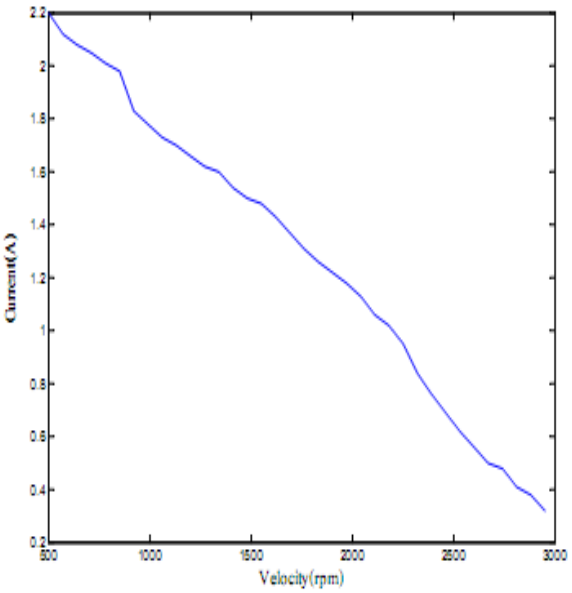
จากสมการที่ 3 และ 4 พบว่าการคำนวณหาแรงกัดจะเท่ากับการหาค่าความแตกต่างของกระแสดีซีเซอร์โวมอเตอร์ช่วงที่ดอกกัดกำลังกัดชิ้นงานกับช่วงที่ดอกกัดยังไม่ได้กัดชิ้นงาน โดยที่ช่วงที่ดอกกัดกำลังกัดชิ้นงาน และช่วงที่ดอกกัดยังไม่ได้กัดชิ้นงาน มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าแรงบิดกัดสามารถประมาณ $J_c \cong J_o$ และ $B_c \cong B_o$ ค่าแรงบิดกัดดังสมการที่ 5

$$Tc = K_t(I_c - I_o) \quad (5)$$

แต่เนื่องจากกระแสช่วงดอกกัดกำลังกัดชิ้นงาน (I_c) และกระแสช่วงที่ดอกกัดยังไม่ได้กัดชิ้นงาน(I_o) มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับค่าความเร็วเชิงมุม สามารถเขียนสมการแรงบิดกัดได้ดังสมการที่ 6

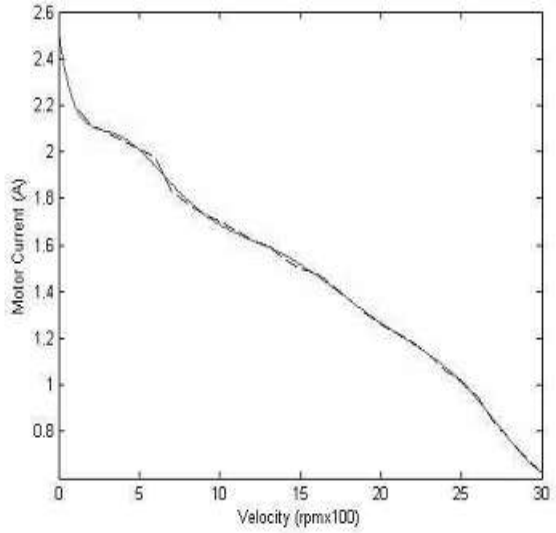
$$Tc = K_t(I_c(\dot{\theta}) - I_0(\dot{\theta})) \quad (6)$$

และเพื่อให้ง่ายต่อการทดลอง กระแสช่วงที่ดอกกัดยังไม่ได้กัดชิ้นงาน $I_o(\dot{\theta})$ สามารถหาค่าได้ในช่วงออฟไลน์



รูปที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขณะดอกกัดยังไม่ได้กัดชิ้นงานเทียบกับความเร็วเชิงมุม

จากรูปที่ 3 สามารถประมาณค่าได้ด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขณะดอกกัดยังไม่ได้กัดชิ้นงานกับค่าความเร็วเชิงมุมได้ดังรูปที่ 4 และดังสมการที่ 7



รูปที่ 4 กราฟเปรียบเทียบกระแสมอเตอร์จริงกับกระแสที่ได้จากการประมาณค่าขณะดอกกัดยังไม่ได้กัดชิ้นงาน
(เส้นทึบคือกระแสมอเตอร์จริง เส้นประคือจากการคำนวณ)

$$I_o(\dot{\theta}) = 1x10^{-30}\dot{\theta}^{10} - 1.9x10^{-26}\dot{\theta}^{9} + 1.4x10^{-22}\dot{\theta}^{8} - 6.5x10^{-19}\dot{\theta}^{7} + 1.8x10^{-15}\dot{\theta}^{6} - 3.5x10^{-12}\dot{\theta}^{5} + 4.4x10^{-9}\dot{\theta}^{4} - 3.6x10^{-6}\dot{\theta}^{3} + 0.0019\dot{\theta}^{2} - 54\dot{\theta} + 69 \quad (7)$$

แทนค่าสมการที่ 7 ลงในสมการที่ 6 จะได้สมการแรงบิดกัด จากนั้นจะต้องแปลงค่าสมการแรงบิดกัดให้เป็นค่าแรงกัดบนแนวระนาบ ดังสมการที่ 8 ค่าแรงกัดเท่ากับ

$$Fc = \frac{2\pi\mu T_c}{p} \quad (8)$$

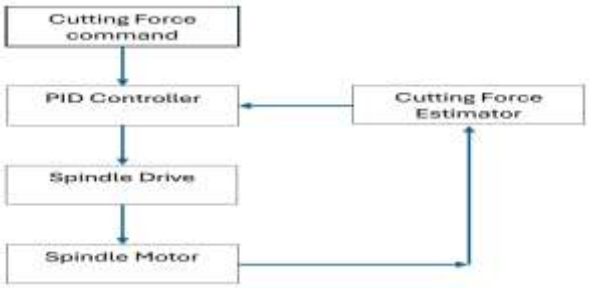
โดยที่

Fc เท่ากับแรงกัดบนแนวระนาบ
μ เท่ากับสัมประสิทธิ์ของบอลสกรู
p เท่ากับพิทช์ของบอลสกรู

3. การควบคุมแรงกัด

การควบคุมแรงกัดของเครื่องกัดซีเอ็นซีให้คงที่ ตามค่าที่ต้องการ สามารถทำได้โดยปรับความเร็วรอบสปินเดิลแบบเรียลไทม์ผ่านการป้อนกลับด้วยตัวประมาณค่าแรงกัด ดังรูป 5 โดยตัวควบคุมแรงกัด ทำหน้าที่ปรับความเร็วรอบการหมุนของสปินเดิล เพื่อให้แรงกัดจริง ลู่เข้าสู่แรงกัดที่ตั้งไว้ตามที่ผู้ใช้งานกำหนด โดยตัวควบคุมที่ใช้เป็นแบบ PID ดังสมการที่ 9

$$u(t) = Kpe(t) + Ki\int e(\tau)\,dt + Kd\frac{de}{dt} \quad (9)$$



รูปที่ 5 ไดอะแกรมตัวควบคุมแรงกัด

ตัวควบคุมจะทำการเปรียบเทียบค่าแรงกัดที่ต้องการ (Ft)* กับค่าแรงกัดจากการประมาณค่า (F) ดังสมการที่ 10

$$E(t) = \mathrm{Ft(t)} - F(t) \quad (10)$$

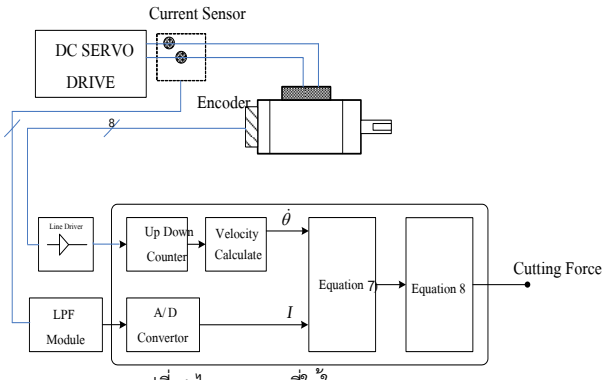
โดยมีเงื่อนไขการทำงานคือ

- Error > 0 : ต้องเพิ่มแรงกัด โดยการลดความเร็วรอบสปินเดิล
- Error < 0 : ต้องลดแรงกัด โดยการเพิ่มความเร็วรอบสปินเดิล

โดยที่ ค่า Ft ได้มาจากการคำนวณ จากค่าความเร็วรอบสปินเดิล ค่าความลึก ค่าความแข็งของวัสดุ อัตราป้อนความลึก และความกว้างตัดและค่าความเร็วของแกนเคลื่อนที่ (Feedrate)

4. การทดลอง

การทดลองกระทำบนเครื่องกัดซีเอ็นซี HURCO ที่ดอกกัดหยาบเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร และส่วนตัวควบคุม PID ใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011 สามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอกคือวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาล็อก และวงจรนับตำแหน่งจาก Increment Encoder ขนาด 2000 PPR(ติดตั้งบนดีซีเซอร์โวมอเตอร์) แรงกัดที่ตั้งไว้ 400 N ความลึก 2 มิลลิเมตร ชิ้นงานเป็นเหล็กกล้าเกรด SKD41

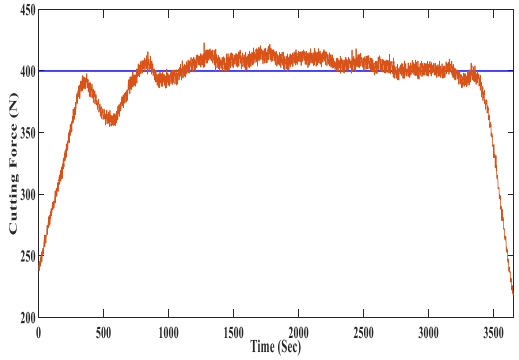


รูปที่ 6 ไดอะแกรมที่ใช้ในการทดลอง

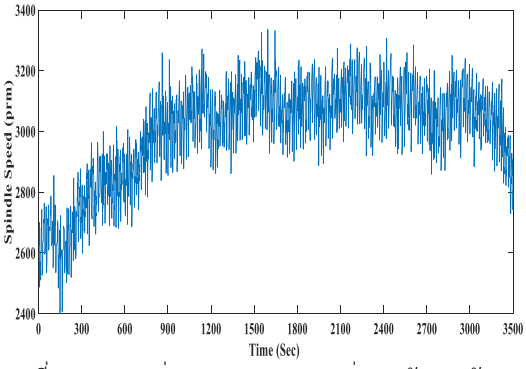
การทดลองในรูปที่ 6 แสดงไดอะแกรมสัญญาณป้อนกลับ โดยที่สัญญาณจากเอนโค้ดเดอร์ถูกส่งไปยังวงจรรับสัญญาณ และส่งต่อไปยังวงจรนับตำแหน่งเพื่อนำไปคำนวณหาค่าความเร็วเชิงมุม จากนั้นนำเอาตัวแปรทั้งหมดคำนวณหาค่าแรงกัด เพื่อป้อนกลับไปยังตัวควบคุมแรงกัด

5. ผลการทดลอง

ในการทดลองเขียนโปรแกรมกัดชิ้นงาน ใช้งานเพียงแกนเดียวคือแกน X ผลการทดลองการควบคุมแรงกัดจะเปรียบเทียบเป็นกราฟผลตอบสนองค่าแรงกัดจากตัวประมาณค่าแรงกัด กับค่าแรงกัดที่ต้องการ ที่ดอกกัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 7 และ 8 ซึ่งผลการทดลองพบว่ากราฟของแรงกัดที่ใช้ตัวควบคุมแรงกัดสามารถควบคุมค่าแรงกัดได้

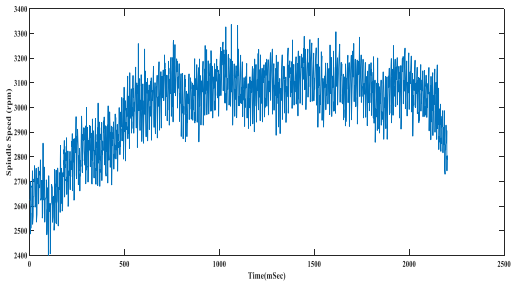


รูปที่ 7 กราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองค่าแรงกัดจากตัวประมาณค่าแรงกัด กับค่าแรงกัดที่ต้องการ



รูปที่ 8 กราฟผลต่างของผลตอบสนองค่าแรงกัดจากตัวประมาณค่าแรงกัด กับค่าแรงกัดที่ต้องการ

จากผลการทดลองในรูปที่ 7 พบว่าผลตอบสนองของแรงกัดมีค่าใกล้กับแรงกัดที่ตั้งไว้ ซึ่งให้เห็นว่าตัวควบคุมสามารถควบคุมได้ และรูปที่ 8 เป็นค่าผิดพลาดค่าแรงกัดจากตัวประมาณ กับค่าแรงกัดที่ต้องการ



รูปที่ 9 แสดงการเปลี่ยนค่าความเร็วสปินเดิล

และค่าอัตราการขยายของ PID มีค่าเท่ากับ [151.2 2.1 3.7] ส่วนรูปที่ 9 แสดงการเปลี่ยนค่าความเร็วสปินเดิล แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพยายามเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วสปินเดิลตลอดเวลาในการควบคุม

6. สรุปผลการทดลอง

การวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาตัวควบคุมความเร็วรอบสปินเดิลของเครื่องกัดซีเอ็นซี เพื่อรักษาแรงกัดให้คงที่ โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมอเตอร์แกน กับแรงกัดเป็นสัญญาณป้อนกลับแทนการใช้ไดนาโมมิเตอร์ การทดลองกัดชิ้นงานเหล็กกล้าแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมสามารถปรับความเร็วรอบสปินเดิลแบบเรียลไทม์ ทำให้แรงกัดมีค่าลู่เข้าสู่แรงกัดเป้าหมายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้อายุการใช้งานของดอกกัดยาวนานขึ้น และคุณภาพผิวงานมีความสม่ำเสมอ จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ตัวควบคุมความเร็วรอบสปินเดิลสามารถควบคุมแรงกัดได้ แต่ทว่าจะต้องมีการพัฒนาเพิ่มเติม เรื่องของการทดลองกับวัสดุอื่น ๆ และความเร็วรอบที่เหมาะสม กับความลึกที่ใช้ในการกัด

เอกสารอ้างอิง

[1] Yusuf Altintas, “ Manufacturing Automation :metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC Design” .: Cambridge University Press 2000

[2] N K Mehta, ”Machine Tool Design and Numerical Control”,McGraw-Hill,1996

[3] L.N. Lopez de Lacalle, A. Lamikiz,”Machine Tools for High performance Machining”,Springer-Verlag London Ltd.

[4] Thomas Childs, Katsuhiro Maekawa, Toshiyuki Obikawa, Yasuo Yamane, “ Metal Machining Theory and Applications”.: John Wiley & Sons Inc.

[5] Hassan El-Hofy,”Fundamentals of Machining process”, Taylor & Francis Group, 2007

[6] Na Wang, Xiangbo Ze, Changsheng Ai, Yumei Ji,”The Adaptive Numerical Control System Based on Cutting Force Restriction”, Proceedings of the Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA'06)

[7] Takashi Matsumura, Takahiro Shirakashi, and Eiji Usui, ”Adaptive Cutting Force Prediction in Milling Processes”, International. Journal. of Automation Technology, Vol.4, 2010

[8] F. Cus, U. Zuperl*, E. Kiker, M. Milfelner,”Adaptive self-learning controller design for feed rate maximisation of machining process”, Journal of Achievement in Materials and Manufacturing Engineering,Vol 31,2008

[9] **Bacciotti A, Rosier L, ”Lyapunov functions and stability in** control theory”, Springer-Verlag, London 2001

Lauderbaugh LK, Ulsoy AG.,” Model reference adaptive force control in milling.”, ASME J Eng Ind 1989;3 :13–21.