

การออกแบบตัวควบคุมซีดีเอ็มลดอันดับสำหรับระบบสองความเฉื่อย

Reduced Order CDM Controller Design for a Two-Inertia System

พันธนีย์ บุญยัง และ ถาวร เบญจนาสุสุทธิ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทรศัพท์: 0-2329-8355 E-mail: kbtaworn@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

ซีดีเอ็มหรือวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถนำมาออกแบบตัวควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพ บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมซีดีเอ็มลดอันดับโดยใช้หลักการลดอันดับของกระบวนการที่มีอันดับสูงให้เป็นแบบจำลองที่มีอันดับต่ำลง จากนั้นจึงออกแบบตัวควบคุมซีดีเอ็มลดอันดับจากแบบจำลองนี้ด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์โดยใช้ค่าตรรกะเสถียรภาพมาตรฐาน เพื่อนำไปควบคุมกระบวนการอันดับสูงเดิมต่อไป ในบทความนี้ใช้ระบบสองความเฉื่อยโดยแบบจำลองถูกลดอันดับลงเป็นแบบจำลองอันดับหนึ่งโดยใช้วิธีประมาณแบบพาเด วิธีเกณฑ์เสถียรภาพของเรอท์และวิธีสมการเสถียรภาพ ผลการทดลองควบคุมความเร็วของระบบสองความเฉื่อยที่ใช้ตัวควบคุมซีดีเอ็มลดอันดับทั้งสามแบบให้ผลใกล้เคียงกัน

คำสำคัญ: แผนผังค่าสัมประสิทธิ์ ระบบสองความเฉื่อย การลดอันดับ

Abstract

CDM or Coefficient Diagram Method is one of powerful methods for designing a controller. The reduced order CDM controller design is proposed in this paper. The higher-order process is first reduced to be a reduced order model. Then the reduced order CDM controller is designed from the model by CDM with standard stability index for controlling the original higher-order process. In this paper, the model of the two-inertia system is reduced to be a first-order model by Padé-type approximation method, Routh stability criterion and Stability equations approach. The experimental results in controlling speed of the two-inertia system using three types of the reduced order CDM controllers are quite similar.

Keywords: Coefficient Diagram Method, two-inertia system, reduced order

1. คำนำ

ในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ จะอาศัยการออกแบบระบบควบคุมเข้ามาช่วยเพื่อให้กระบวนการผลิตต่าง ๆ สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องแม่นยำ มีประสิทธิภาพ และได้ผลิตผลที่มีคุณภาพตามที่ต้องการ ซึ่งต้องเลือกใช้และออกแบบตัวควบคุมให้เหมาะสมกับระบบควบคุมนั้น ๆ ในการออกแบบตัวควบคุมแบ่งเป็น 2 ทฤษฎีหลัก คือ ทฤษฎีการควบคุมแบบดั้งเดิม (Classical control theory) ซึ่งเป็นทฤษฎีการควบคุมที่ออกแบบและวิเคราะห์บนโดเมนความถี่ด้วย

แบบจำลองในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) และทฤษฎีการควบคุมแบบสมัยใหม่ (Modern control theory) ซึ่งเป็นทฤษฎีการควบคุมที่ออกแบบและวิเคราะห์บนโดเมนเวลา โดยออกแบบตัวควบคุมจากแบบจำลองในรูปปริภูมิสถานะ (State-space representation) สำหรับทฤษฎีการควบคุมแบบดั้งเดิมจะใช้วิธีผลตอบสนองความถี่ (Frequency response) และวิธีทางเดินราก (Root locus) เป็นต้น ส่วนทฤษฎีการควบคุมแบบสมัยใหม่จะใช้วิธีควบคุมแบบเหมาะสมที่สุด (Optimal control) เป็นต้น

ในปี 1998 ศาสตราจารย์ซุนจิ มานาเบะ (Shunji Manabe) ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมที่เรียกว่า วิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์หรือซีดีเอ็ม (Coefficient Diagram Method: CDM) [1] ซึ่งเป็นทฤษฎีการควบคุมแบบดั้งเดิม ซีดีเอ็มเป็นวิธีการออกแบบระบบควบคุมทางพีชคณิตที่อาศัยโครงสร้างในรูปพหุนามคุณลักษณะวงปิด ซึ่งตัวควบคุมจะถูกออกแบบโดยอาศัยพื้นฐานของตรรกะเสถียรภาพ (Stability index) และค่าคงตัวเวลาสมมูล (Equivalent time constant) เพื่อให้ระบบควบคุมมีเสถียรภาพ และมีความเร็วของผลตอบสนองของระบบวงปิดตามที่ต้องการ วิธีการของซีดีเอ็มนี้ สามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าของตัวควบคุมที่จะทำให้ได้ผลตอบสนองแบบหน่วงเกิน (Over-damped response) ได้อย่างไรก็ตาม การหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเพื่อควบคุมกระบวนการอันดับสูงค่อนข้างเสียเวลา

ตัวควบคุมที่ทำหน้าที่ควบคุมกระบวนการทางอุตสาหกรรมให้มีสมรรถนะของระบบตามที่ต้องการนั้น ถ้าหากเป็นกระบวนการอันดับสูง มักจะถูกประมาณให้เป็นแบบจำลองอันดับต่ำลงเพื่อง่ายต่อการออกแบบ ซึ่งวิธีการประมาณเพื่อให้ได้แบบจำลองอันดับต่ำนั้น แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม [2] คือ การลดอันดับด้วยการประมาณสมการพหุนาม (Polynomial approximations) การลดอันดับด้วยการตัดสเทท (State truncations) และการลดอันดับด้วยการประมาณพารามิเตอร์ (Parameter approximations)

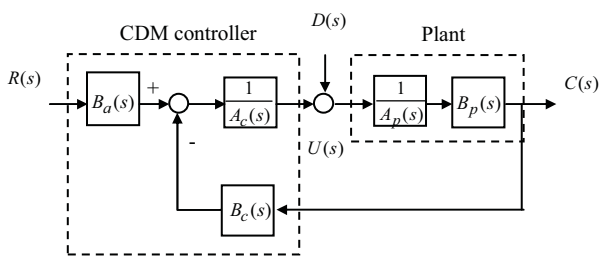
ในงานวิจัยนี้ นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมซีดีเอ็มลดอันดับสำหรับระบบสองความเฉื่อย ซึ่งอันดับของแบบจำลองของระบบสองความเฉื่อยถูกประมาณให้มีอันดับต่ำลง เรียกว่า แบบจำลองอันดับต่ำ โดยอาศัยวิธีการลดอันดับด้วยการประมาณสมการพหุนาม 3 วิธี ได้แก่ วิธีการประมาณแบบพาเด (Padé-type approximation method) [2-3] วิธีเกณฑ์เสถียรภาพของเรอท์ (Routh stability criterion) [2], [4] และวิธีสมการเสถียรภาพ (Stability equations approach) [2], [5] หลังจากนั้นจึงออกแบบตัวควบคุมซีดีเอ็มลดอันดับจากแบบจำลองอันดับต่ำของระบบสองความเฉื่อยด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ โดยใช้ค่าตรรกะเสถียรภาพมาตรฐาน γ_i แล้วจึงใช้ตัวควบคุมซีดีเอ็มลดอันดับนี้ไปควบคุมความเร็วของระบบสองความเฉื่อย พร้อมทั้งแสดงผลการทดลองในการควบคุม

ความเร็วของระบบสองความถี่ในห้วงปฏิบัติการ เพื่อแสดงประสิทธิภาพของตัวควบคุมซีดีเอ็มอันดับที่นำเสนอ

2. ซีดีเอ็ม

ศาสตราจารย์ซุนจิ มานาเบะ (Shunji Manabe) นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมด้วยหลักการของซีดีเอ็ม ซึ่งใช้แผนผังค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient diagram) เป็นเครื่องมือในการออกแบบตัวควบคุม เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและสามารถออกแบบตัวควบคุมให้ได้สมรรถนะของระบบควบคุมตามที่ต้องการ

โครงสร้างมาตรฐานของซีดีเอ็มสำหรับระบบ SISO (Single-Input-Single-Output) ประกอบด้วยตัวควบคุมแบบซีดีเอ็มและกระบวนการ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างมาตรฐานของระบบควบคุมซีดีเอ็มสำหรับระบบ SISO

กระบวนการของระบบ SISO ในรูปที่ 1 ประกอบด้วย $A_p(s)$ และ $B_p(s)$ ซึ่งอยู่ในรูปพหุนามดังแสดงในสมการที่ (1ก) และ (1ข)

$$A_p(s) = p_k s^k + p_{k-1} s^{k-1} + \dots + p_0 \quad (1ก)$$

$$B_p(s) = q_m s^m + q_{m-1} s^{m-1} + \dots + q_0 \quad (1ข)$$

และตัวควบคุมแบบ CDM ประกอบด้วย $A_c(s)$, $B_c(s)$ และ $B_a(s)$ ซึ่งอยู่ในรูปพหุนามแสดงด้วยสมการที่ (2ก), (2ข) และ (3) ตามลำดับดังนี้

$$A_c(s) = l_\lambda s^\lambda + l_{\lambda-1} s^{\lambda-1} + \dots + l_0 \quad (2ก)$$

$$B_c(s) = k_\lambda s^\lambda + k_{\lambda-1} s^{\lambda-1} + \dots + k_0 \quad (2ข)$$

$$B_a(s) = k_0 \quad (3)$$

โดยที่ $\lambda < k$ และ $m < k$ สำหรับ $B_a(s)$ นั้นเป็นพรีฟิลเตอร์ของระบบควบคุม ซึ่งทำหน้าที่ให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมไม่มีค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว (Steady-state error) ถ้า $B_a(s)$ มีค่าเท่ากับ k_0 จะทำให้ผลตอบสนองของระบบไม่มีค่าพุ่งเกิน แต่ค่าช่วงเวลาขึ้น (Rise time) จะช้า และถ้า $B_a(s)$ มีค่าเท่ากับตัวเศษของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม $B_c(s)$ จะทำให้ผลตอบสนองมีค่าพุ่งเกิน แต่ค่าช่วงเวลาขึ้นจะน้อยลง และเนื่องจากระบบควบคุมนี้มีฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม 2

ฟังก์ชัน ดังนั้นจึงถูกเรียกว่า ระบบสองระดับขั้นเสรี (Two-degree-of-freedom: 2DOF) โดยโครงสร้างของระบบ 2DOF นั้น เมื่อนำมาใช้ในการควบคุมกระบวนการต่าง ๆ จะทำให้ระบบควบคุมมีประสิทธิภาพดี เนื่องจากระบบ 2DOF สามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงที่กำหนดและสามารถกำจัดอิทธิพลของสัญญาณรบกวน $D(s)$ ที่เข้ามาในระบบได้

พหุนามคุณลักษณะของระบบวงปิดจากโครงสร้างมาตรฐานของซีดีเอ็มในรูปที่ 1 โดยไม่มีพรีฟิลเตอร์จะสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$P(s) = A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 = \sum_{i=0}^n a_i s^i \quad (4)$$

โดยที่ $a_0, a_1, \dots, a_n$ คือสัมประสิทธิ์ของพหุนามคุณลักษณะของระบบวงปิด (Closed-loop system) ซึ่งสัมประสิทธิ์เหล่านี้จะประกอบด้วยพารามิเตอร์ของกระบวนการที่ทราบค่าแล้วและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ยังไม่ทราบค่า ซึ่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมนี้จะถูกออกแบบด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งจะกล่าวต่อไป

วิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ จะเป็นการออกแบบจากระบบควบคุมทั้งระบบ โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม จะประกอบด้วยค่าธรรมชาติเสถียรภาพ γ_i ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดเสถียรภาพของระบบ และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดความเร็วของผลตอบสนองของระบบ ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวนี้จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพหุนามคุณลักษณะ ส่วนค่าจำกัดเสถียรภาพ (Stability limit) γ_i^* จะเป็นตัวบอกความคมทนต่อการเปลี่ยนแปลงสำหรับความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของค่าธรรมชาติเสถียรภาพ γ_i กับสัมประสิทธิ์ของพหุนามคุณลักษณะ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (5) ค่าคงตัวเวลาสมมูล τ กับสัมประสิทธิ์ของพหุนามคุณลักษณะ แสดงดังสมการที่ (6) และค่าจำกัดเสถียรภาพ γ_i^* กับค่าธรรมชาติเสถียรภาพ γ_i จะแสดงได้ดังสมการที่ (7) ดังนี้

$$\gamma_i = \frac{a_i^2}{a_{i+1}a_{i-1}} \quad (5)$$

$$\tau = \frac{a_1}{a_0} \quad (6)$$

$$\gamma_i^* = \frac{1}{\gamma_{i+1}} + \frac{1}{\gamma_{i-1}}, \quad \gamma_n = \gamma_0 = \infty \quad (7)$$

โดยที่ $i = 1, \dots, n-1$

ในวิธีการของซีดีเอ็มได้เสนอแนะค่าธรรมชาติเสถียรภาพ γ_1 ให้มีค่าเท่ากับ 2.5 จะทำให้ผลตอบสนองชั่วคราวดีขึ้น กล่าวคือ ผลตอบสนองไม่มีค่าพุ่งเกินและค่าช่วงเวลาขึ้นมีค่าลดลง ดังนั้น ค่าธรรมชาติเสถียรภาพมาตรฐาน γ_i ของวิธีการซีดีเอ็ม คือ

$$\gamma_{n-1} = \dots = \gamma_3 = \gamma_2 = 2, \quad \gamma_1 = 2.5 \quad (8)$$

และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ จะมีความสัมพันธ์กับค่าช่วงเวลาเข้าที่ t_s ดังนี้

$$t_s = 2.5\tau \sim 3\tau \quad (9)$$

จากความสัมพันธ์ของค่าตรรกซ์เสถียรภาพ γ_i ในสมการที่ (5) และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ในสมการที่ (6) สามารถเขียนสัมประสิทธิ์ a_i ของพหุนามคุณลักษณะ $P(s)$ ดังสมการต่อไปนี้

$$a_i = a_0 \tau^i \left(\frac{1}{\gamma_{i-1} \dots \gamma_2 \gamma_1^{i-1}} \right) = a_0 \tau^i \left(\prod_{j=1}^{i-1} \frac{1}{\gamma_{i-j}} \right) \quad (10)$$

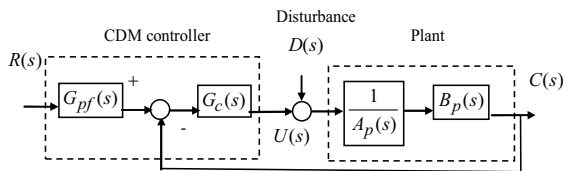
เมื่อแทนค่าสัมประสิทธิ์ a_i แต่ละค่าลงในสมการที่ (4) จะได้พหุนามคุณลักษณะ $P(s)$ ที่อยู่ในเทอมของค่า a_0 , τ และ γ_i ดังนี้

$$P(s) = a_0 \left[\sum_{i=2}^n \left(\prod_{j=1}^{i-1} \frac{1}{\gamma_{i-j}} \right) (\tau s)^i \right] + \tau s + 1 \quad (11)$$

ดังนั้น เมื่อรู้แบบจำลองของกระบวนการแล้ว พารามิเตอร์ของตัวควบคุมก็ได้จากการนำพหุนามคุณลักษณะแสดงดังสมการที่ (4) ไปเปรียบเทียบกับสมการที่ (11) ซึ่งรู้ค่าของดัชนีเสถียรภาพ γ_i และ/หรือค่าของค่าคงตัวเวลาสมมูล τ

3. การออกแบบตัวควบคุมซีดีเอ็มลดอันดับ

โครงสร้างของระบบควบคุมซีดีเอ็มที่ปรับโครงสร้างจากรูปที่ 1 ใหม่เพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบตัวควบคุมแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 โครงสร้างของระบบควบคุมซีดีเอ็มที่ปรับโครงสร้างใหม่

เมื่อจัดโครงสร้างได้ดังรูปที่ 2 แล้ว ฟังก์ชันถ่ายโอน $G_c(s)$ ของตัวควบคุมและพรีฟิวเตอร์ (Pre-filter) $G_{pf}(s)$ ตามลำดับดังนี้

$$G_c(s) = \frac{B_c(s)}{A_c(s)} \quad (12)$$

และ

$$G_{pf}(s) = \frac{B_a(s)}{B_c(s)} \quad (13)$$

การออกแบบตัวควบคุมซีดีเอ็มลดอันดับ มีขั้นตอนการออกแบบเป็นดังนี้

1. กำหนดตัวควบคุมเป็นรูปแบบอินทิกรัล (Integral form) หรือระบบชนิด 1 (Type 1 system) เพื่อให้ค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว (Steady-state error) มีค่าเป็นศูนย์ จะได้ตัวควบคุมดังสมการ

$$\hat{G}_c(s) = \frac{k_\lambda s^\lambda + k_{\lambda-1} s^{\lambda-1} + \dots + k_0}{s(l_\lambda s^\lambda + l_{\lambda-1} s^{\lambda-1} + \dots + l_0)} \quad (14)$$

2. ลดอันดับกระบวนการอันดับสูงลงเป็นแบบจำลองอันดับหนึ่งที่ไม่มีซีโรดังสมการ

$$\tilde{G}_p(s) = \frac{q_0}{s + p_0} \quad (15)$$

3. หาสมการพหุนามคุณลักษณะของระบบวงปิดซึ่งสมการพหุนามคุณลักษณะนี้จะประกอบด้วยพารามิเตอร์ของกระบวนการที่รู้ค่าแล้วและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ไม่รู้ค่าและต้องออกแบบเพื่อหาพารามิเตอร์ไม่ทราบค่า

4. กำหนดค่าตรรกซ์เสถียรภาพมาตรฐาน γ_i ที่เหมาะสมกับกระบวนการ

5. แก่สมการพหุนามคุณลักษณะของระบบวงปิดเพื่อหาพารามิเตอร์ไม่ทราบค่า โดยอาศัยความสัมพันธ์ของค่าตรรกซ์เสถียรภาพ γ_i ค่าคงตัวเวลาสมมูล τ และสัมประสิทธิ์ของพหุนามคุณลักษณะ ในสมการที่ (5-6)

6. กำหนดพรีฟิวเตอร์ $B_a(s)$ เท่ากับ k_0

7. จากสมการที่ (14) และสมการที่ (15) จะได้ตัวควบคุมซีดีเอ็มลดอันดับที่ประกอบด้วยตัวควบคุม

$$\tilde{G}_c(s) = \frac{k_0}{s} \quad (16)$$

และพรีฟิวเตอร์

$$\tilde{G}_{pf}(s) = \frac{k_0}{k_0} = 1 \quad (17)$$

โดยที่ $\tilde{A}_c(s) = s$, $\tilde{B}_c(s) = k_0$, และ $\tilde{B}_a(s) = k_0$. และจากโครงสร้างของตัวควบคุมซีดีเอ็มลดอันดับ พบว่าระบบควบคุมวงปิดจะเป็นระบบอันดับสอง ดังนั้น ค่าตรรกซ์เสถียรภาพมาตรฐาน $\gamma_1 = 2.5$ เพียงค่าเดียวที่ถูกนำมาใช้ในพหุนามคุณลักษณะ

4. ผลการทดลอง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงระบบสองความเฉื่อยและผลการทดลองควบคุมความเร็วเมื่อใช้ตัวควบคุมซีดีเอ็มลดอันดับ

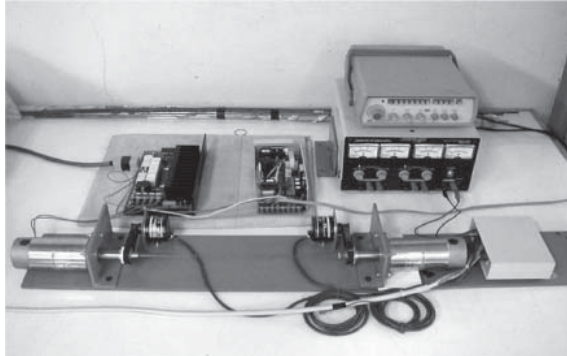
4.1 ระบบสองความเฉื่อย

รูปที่ 3 เป็นรูปของระบบสองความเฉื่อยในห้องปฏิบัติการที่ใช้ในการทดลองควบคุมความเร็ว [6] โดยมีฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบซึ่งเป็นระบบอันดับสี่ดังนี้

$$G_p(s) = \frac{3.67 \times 10^4 s^2 + 5.13 \times 10^7}{s^4 + 2.5 \times 10^3 s^3 + 1.45 \times 10^5 s^2 + 7.39 \times 10^6 s + 1.98 \times 10^8} \quad (18)$$

เมื่อลดอันดับของระบบสองความเฉื่อยลงเป็นแบบจำลองอันดับหนึ่งไม่มีซีโรด้วยวิธีการประมาณแบบพาเด (Padé) วิธีเกณฑ์เสถียรภาพ

ของเรท (RSC) และวิธีสมการเสถียรภาพ (Stability) ได้ผลลัพธ์ดังแสดงในตารางที่ 1 และจากการออกแบบที่แสดงในหัวข้อ 3 จะได้ตัวควบคุมซีดีเอ็มลด์อันดับทั้งสามตัวซึ่งแสดงในตารางที่ 1 ด้วยแล้ว



รูปที่ 3 ระบบสองความถี่ในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 1 แบบจำลองอันดับหนึ่งและตัวควบคุม

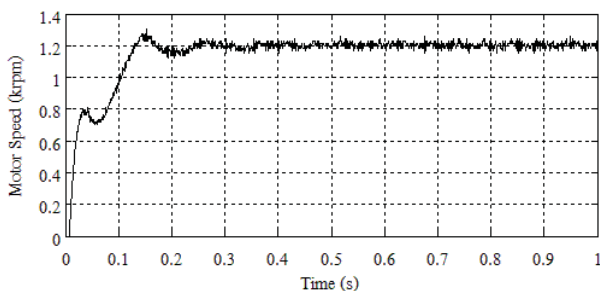
วิธี	แบบจำลองอันดับหนึ่ง	ตัวควบคุมซีดีเอ็มลด์อันดับ
Padé	$\tilde{G}_{pp}(s) = \frac{6.9418}{s + 26.7930}$	$\tilde{G}_{cp}(s) = \frac{41.3648}{s}$
RSC	$\tilde{G}_{pr}(s) = \frac{6.9420}{s + 26.7900}$	$\tilde{G}_{cr}(s) = \frac{41.3543}{s}$
Stability	$\tilde{G}_{ps}(s) = \frac{6.9418}{s + 26.8200}$	$\tilde{G}_{cs}(s) = \frac{41.4482}{s}$

4.2 ผลการทดลอง

ในข้อนี้ จะแสดงผลการทดลองควบคุมความเร็วของระบบสองความถี่ที่ความเร็ว 1200 รอบต่อนาทีเมื่อถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมซีดีเอ็มลด์อันดับ

4.2.1 ผลตอบสนองวงเปิดของระบบ

เมื่อป้อนสัญญาณอ้างอิงแบบขั้นบันไดที่ 4.65 โวลต์ให้กับระบบสองความถี่ จะได้ผลตอบสนองวงเปิดดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งพบว่าผลตอบสนองวงเปิดที่ได้นั้นเกิดเรโซแนนซ์การบิดขึ้น



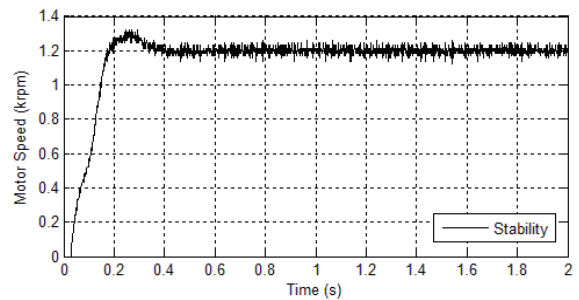
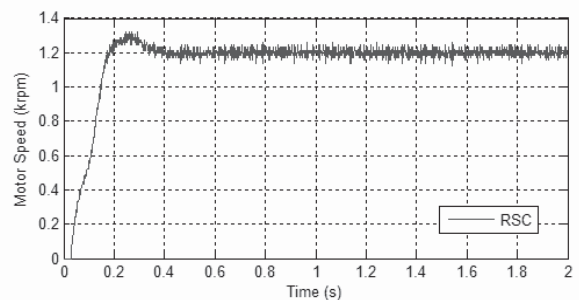
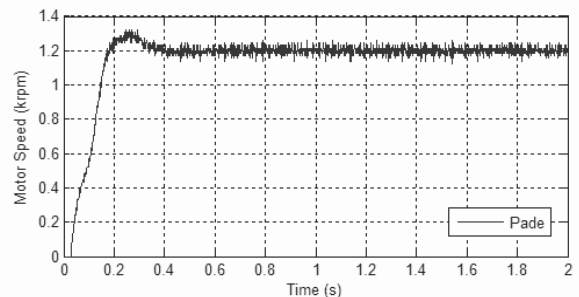
รูปที่ 4 ผลตอบสนองวงเปิดของระบบต่อสัญญาณขั้นบันได

4.2.2 การควบคุมความเร็วของระบบเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได

เมื่อนำตัวควบคุมซีดีเอ็มลด์อันดับทั้ง 3 ตัวมาควบคุมความเร็วของระบบสองความถี่ที่ความเร็ว 1200 รอบต่อนาที จะได้

ผลตอบสนองแสดงดังรูปที่ 5 พบว่า ตัวควบคุมซีดีเอ็มลด์อันดับทั้ง 3 สามารถควบคุมความเร็วของระบบสองความถี่เดิมที่ความเร็ว 1200 รอบต่อนาทีได้โดยไม่มีค่าความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว รวมทั้งไม่มีเรโซแนนซ์การบิด

สำหรับสมรรถนะของระบบที่ได้จากการควบคุมความเร็วของระบบสองความถี่ด้วยตัวควบคุมซีดีเอ็มลด์อันดับที่นำเสนอทั้ง 3 กรณี นั้น พบว่า มีสมรรถนะที่ดีเหมือนกันและไม่จำเป็นต้องปรับแต่งตัวควบคุมและค่าคงตัวเวลาสมมูล τ สำหรับค่าช่วงเวลารั้ง t_r , ค่าช่วงเวลาลง $(\pm 2\%)t_s$ และค่าเปอร์เซ็นต์ฟุ้งเกินสูงสุด M_p เมื่อใช้ตัวควบคุมแต่ละกรณี แสดงได้ดังตารางที่ 2



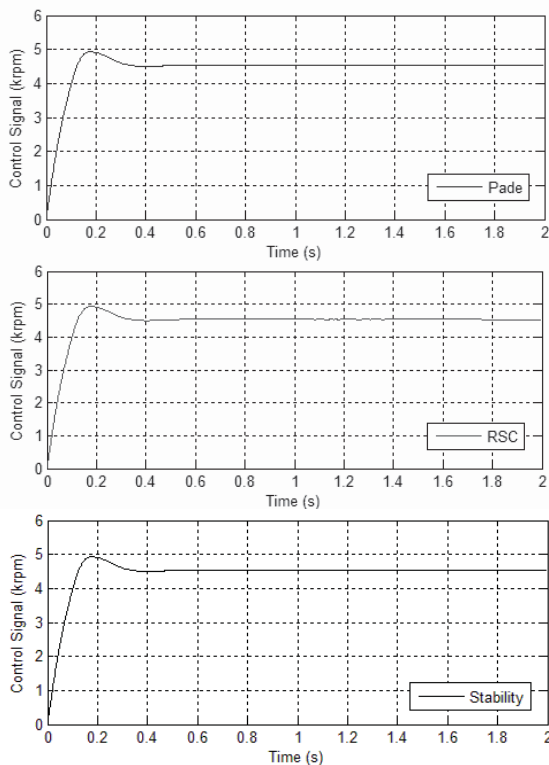
รูปที่ 5 ผลการทดลองระบบควบคุมที่ความเร็ว 1200 รอบต่อนาที

ตารางที่ 2 สมรรถนะของระบบควบคุม

ตัวควบคุม	t_r (s)	t_s (s)	M_p (%)
$\tilde{G}_{cp}(s)$	0.177	0.350	7.50
$\tilde{G}_{cr}(s)$	0.177	0.350	7.50
$\tilde{G}_{cs}(s)$	0.174	0.359	8.75

จากตารางที่ 2 พบว่าตัวควบคุมทั้ง 3 มีสมรรถนะที่ดีใกล้เคียงกัน อีกทั้งมีค่าเปอร์เซ็นต์ฟุ้งเกินสูงสุด M_p ที่ไม่เกิน 20 %

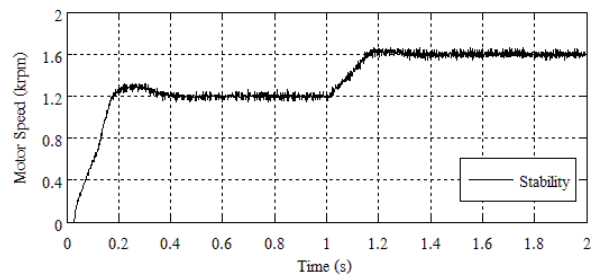
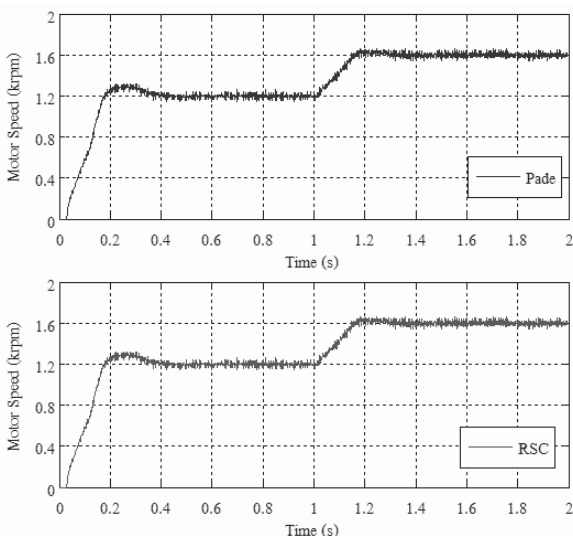
การทดลองระบบควบคุมที่ความเร็ว 1200 รอบต่อนาที พบว่าสัญญาณควบคุมของระบบทั้ง 3 มีลักษณะของสัญญาณควบคุมใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 สัญญาณควบคุมที่ความเร็ว 1200 รอบต่อนาที

4.2.3 การควบคุมเมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็ว

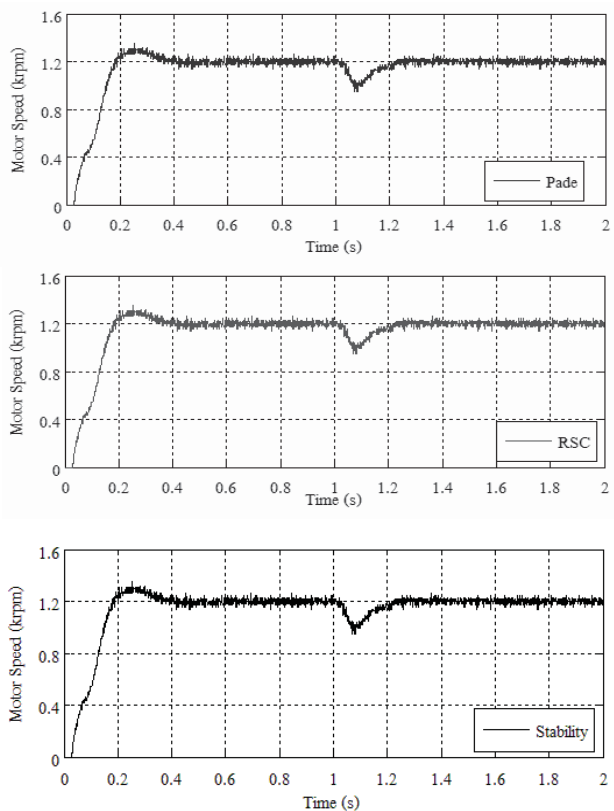
ในหัวข้อนี้ จะศึกษาความสามารถของตัวควบคุมซิติเอ็มลัดอันดับว่า เมื่อเปลี่ยนความเร็วแล้ว ตัวควบคุมจะสามารถควบคุมระบบได้หรือไม่ โดยเพิ่มความเร็วจาก 1200 รอบต่อนาทีเป็น 1600 รอบต่อนาทีอย่างฉับพลันที่เวลา 1 วินาที และได้ผลการควบคุมแสดงดังรูปที่ 7 ซึ่งพบว่า ตัวควบคุมที่นำเสนอยังคงสามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์ของระบบสองความถี่ให้เข้าสู่ค่าอ้างอิงใหม่ที่ 1600 รอบต่อนาทีได้



รูปที่ 7 ผลการทดลองระบบควบคุมเมื่อเพิ่มความเร็วเป็น 1600 รอบต่อนาที

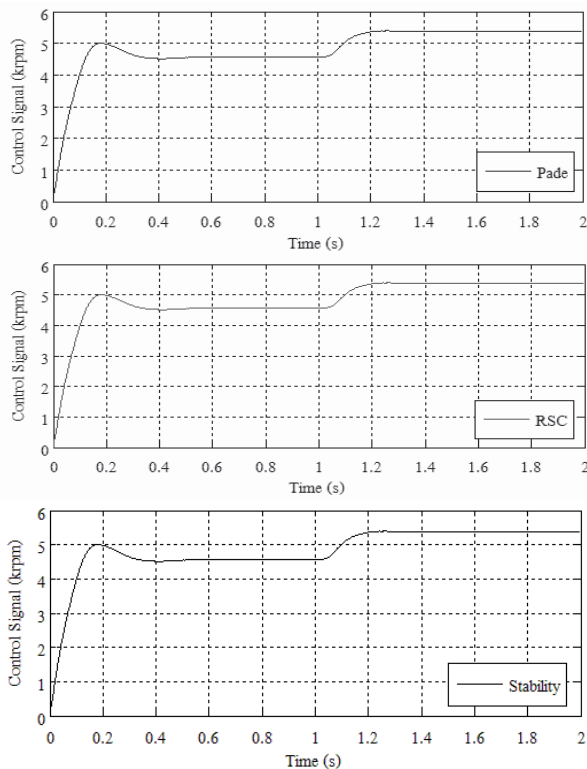
4.2.4 การควบคุมเมื่อมีแรงบิดรบกวน

ในหัวข้อนี้เลือกใส่แรงบิดการรบกวนโดยต่อค่าความต้านทานขนาด 1 โอห์ม แกมมोटอร์ที่ทำหน้าที่เป็นภาระที่เวลา 1 วินาที ภายหลังจากที่ระบบควบคุมความเร็วของระบบสองความถี่จะสามารถควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ความเร็ว 1200 รอบต่อนาทีแล้ว ผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของระบบควบคุมแสดงดังรูปที่ 8 และรูปที่ 9 ตามลำดับ



รูปที่ 8 ผลการทดลองกำจัดผลกระทบจากแรงบิดการรบกวนของระบบควบคุม

จากผลการทดลองพบว่า ตัวควบคุมซิติเอ็มลัดอันดับทั้ง 3 ตัวสามารถกำจัดผลกระทบจากแรงบิดการรบกวนและกลับเข้าสู่ความเร็วที่ 1200 รอบต่อนาทีได้ และนอกจากนี้พบว่า ตัวควบคุมซิติเอ็มลัดอันดับทั้ง 3 ตัวให้ความเร็วต่ำสุดอยู่ที่ 945 รอบต่อนาที



รูปที่ 9 สัญญาณควบคุมที่ความเร็ว 1200 รอบต่อนาทีเมื่อมีแรงบิดการรบกวนของระบบควบคุม

5. สรุป

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมซีดีเอ็มลดอันดับสำหรับระบบสองความเฉื่อย ซึ่งพบว่า ตัวควบคุมทั้ง 3 ตัวมีประสิทธิภาพและสมรรถนะในการควบคุมความเร็วของระบบสองความเฉื่อยใกล้เคียงกัน โดยไม่มีค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวและสามารถขจัดเรโซแนนซ์การบิดของระบบสองมวลได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Manabe, "Coefficient Diagram Method," in *Proc. of the 14th IFAC Symposium Automatic Control in Aerospace*, pp. 199-210, 1998.
- [2] L. Fortuna, G. Nunnari and A. Gallo, *Model Order Reduction Techniques with Application in Electrical Engineering*, Germany: Springer-Verlag London Limited, 1992.
- [3] Y. Shamash, "Stable reduced order models using Padé type approximations," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 19, pp. 615-616, 1974.
- [4] M. F. Hutton and B. Friedland, "Routh approximations for reducing order of linear, time-invariant systems," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 20, no. 3, pp. 329-337, Jun. 1975.

- [5] T. C. Chen, C. Y. Chang, K. W. Han, "Reduction of transfer functions by the stability-equation method," *J. Franklin Inst.*, vol. 308, pp. 389-404, Oct. 1979.
- [6] P. Boonyoung, T. Benjanarasuth, "Simplified Design of CDM Controllers for Speed Control of Two-Inertia Systems," in *Proc. of the 4th Asia International Symposium on Mechatronics (AISM 2010)*, pp. 269-274, 2010.

ประวัติผู้เขียนบทความ

นางสาวพนธนี บุญยัง สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิศวกรรมระบบควบคุม สจล. ขณะนี้กำลังศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

งานวิจัยที่สนใจ Control Systems

รศ.ดร.ถาวร เบญจนาสุทธี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี คณิตศาสตร์ มร. และวิศวกรรมระบบควบคุม สจล. ระดับปริญญาโท EE:Systems U. Michigan ระดับปริญญาเอก Control Engineering Tokai U. ปัจจุบัน ดำรงตำแหน่งประธานหลักสูตร วศ.บ. (วิศวกรรมระบบควบคุม) สจล.

งานวิจัยที่สนใจ Control Systems