

ตัวควบคุมแบบฟัซซี่ชนิดปรับค่าด้วยตัวเอง SELF-TUNING FUZZY CONTROLLER

กิตติ ไพฑูรย์วัฒนกิจ
Kitti Paithoonwattanakij
ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

นิमित บุญภิรมย์
Nimit Boonpirom
ห้องวิจัย Image & Graphic
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอตัวควบคุมแบบฟัซซี่โลจิก (Fuzzy logic controller) ที่สามารถปรับค่าได้ด้วยตัวเอง (Self-Tuning) เนื้อหาจะกล่าวถึงโครงสร้างของตัวควบคุมแบบฟัซซี่โลจิก การปรับกฎด้วยตัวเองและการเรียนรู้ (learning) การตอบสนองของงานที่ต้องการควบคุมด้วยวิธีการต่างๆ ระบบควบคุมชนิดนี้มีส่วนประกอบไม่ซับซ้อนสามารถปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ง่าย มีวิธีปรับค่าด้วยตัวเองหลายวิธีเหมาะที่จะประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า การควบคุมกระบวนการในโรงงานอุตสาหกรรม, และการควบคุมแขนกล เป็นต้น สำหรับการทดลองใช้ตัวควบคุมฟัซซี่โลจิกแบบปิด (Close loop) ชนิดปรับค่าด้วยตัวเอง โดยทดสอบการควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงขนาดเล็ก เพื่อดูผลการตอบสนองระหว่างช่วงความเร็ว (step response) และเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลง (step load)

ASBTRACT

In this article, the self-tuning fuzzy logic control system is proposed which consists of the structure of fuzzy logic control system, the self-tuning, and the learning. The components of this scheme are not complicated, and the parameter values can be easily modified. The self-tuning fuzzy logic control system can be applied to the industries such as electrical motor control, industrial process control, robotic control, etc. Finally, for the experimental results, the close loop self-tuning fuzzy logic controller with the small size d.c. motor speed control both step response and step load is tested.

บทนำ

ตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก (Fuzzy logic controller) เป็นอุปกรณ์ควบคุมชนิดหนึ่ง ซึ่งมีการสั่งการและการตัดสินใจคล้ายกับการตัดสินใจของมนุษย์ในปัญหาที่คลุมเครือโดยการประมาณ ส่วนประกอบของระบบไม่จำเป็นต้องมีกระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน เงื่อนไขจะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของงานที่จะควบคุม รวมกับข้อมูลจากประสบการณ์ของผู้ชำนาญการในระบบนั้นๆ

ในการออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกที่ดี ต้องมีการเลือกฟังก์ชันความเป็นสมาชิกในส่วนต่างๆ ให้เหมาะสมกับงานมีการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชัน และกฎต่างๆ ให้ถูกต้อง เทียบตรง ฐานความรู้ (Knowledge Base) จะเป็นที่เก็บตัวแปรและกฎควบคุมต่างๆ ที่ใช้ในระบบ ถือว่าเป็นส่วนที่มีความสำคัญของระบบ การออกแบบฐานความรู้จะแบ่งได้เป็น 2 ชนิด [1]

- ฐานความรู้ฟัซซีแบบสถิต (Static fuzzy knowledge base) เป็นฐานความรู้ที่ถูกสร้างขึ้นจากฐานข้อมูลและประสบการณ์ชำนาญการของระบบ โดยผู้สร้างได้ทำการปรับแต่งสมบูรณ์แล้ว มักจะใช้กับระบบประเภทระบบเปิด (Open loop) มีการตอบสนองทางเอาต์พุตค่อนข้างคงที่ มีเสถียรภาพตามพฤติกรรมที่ผ่านมาในอดีตและระดับฐานความรู้ที่ใช้ มีการตอบสนองการรบกวน (disturbance) ช่างจำกัด

- ฐานความรู้ฟัซซีแบบพลวัต (Dynamic fuzzy knowledge base) เป็นฐานความรู้ที่สามารถปรับค่าด้วยตัวเองตามการตอบสนองของงาน เพื่อให้เป็นไปตามค่าที่กำหนดไว้อย่างรวดเร็วและแม่นยำที่สุด จะใช้กับระบบควบคุมแบบปิด (Close loop)

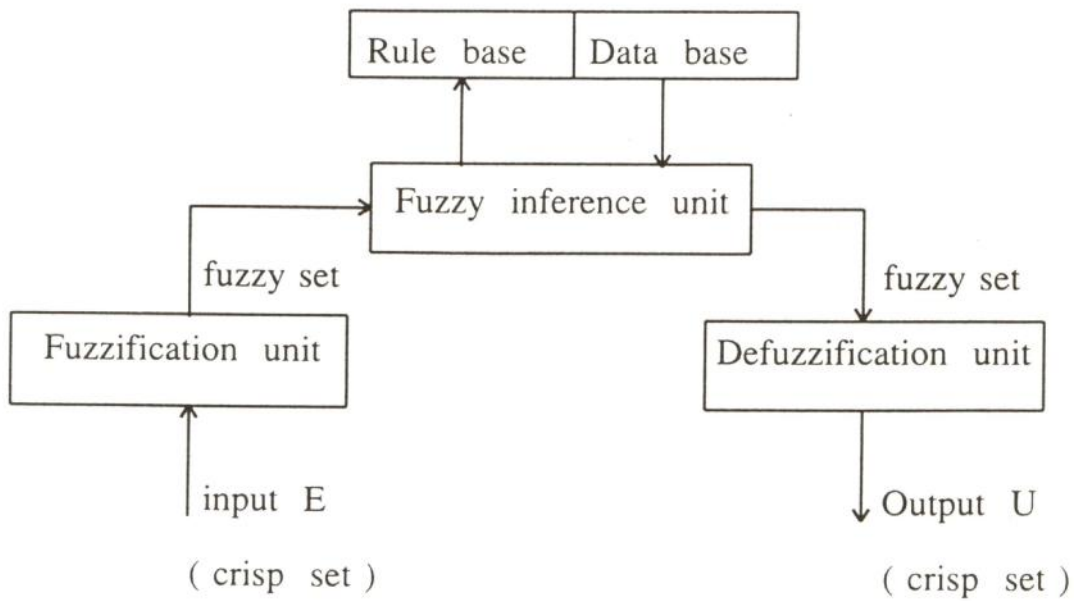
1. ตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก

โครงสร้างพื้นฐานของการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก [1] ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วน คือ fuzzification, fuzzy inference, knowledge base ซึ่งประกอบด้วย rule base, data base และ defuzzification [1][2] (ดังแสดงในรูปที่ 1) ซึ่งฐานข้อมูลเป็นแบบสถิต

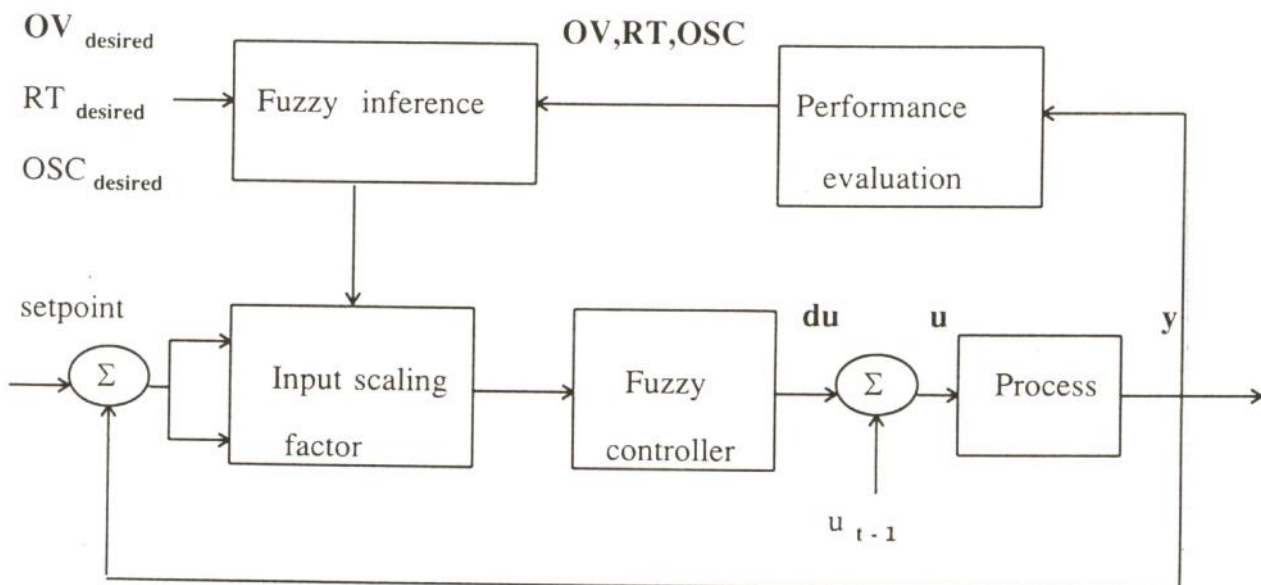
2. การเรียนรู้ระบบด้วยตัวเอง

ในระบบควบคุมแบบฟัซซีลอจิก ถ้างานที่ควบคุมมีการตอบสนองที่เปลี่ยนแปลงไปจะเนื่องมาจากเหตุผลใดก็ตาม การกำหนดเงื่อนไขแบบคงที่ อาจทำให้ระบบควบคุมนั้นล้มเหลว ถ้าเงื่อนไขในการสร้างฐานความรู้ไม่ละเอียดพอ ดังนั้นเราอาจจะใช้ฐานข้อมูลแบบพลวัต เพื่อให้ระบบควบคุมมีการปรับตัวให้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่เกิดขึ้นและมีการตอบสนองกับการเปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็ว วิธีการนี้จะต้องมีการตรวจสอบสมรรถนะ (performance) ของระบบในสภาวะต่างๆ ให้เป็นไปตามค่าที่ได้กำหนดไว้ วิธีการนี้เราจะให้ระบบได้เรียนรู้ และปรับแต่งฟังก์ชันและกฎต่างๆ ด้วยตนเอง โดยกำหนดสมรรถนะของระบบเป็นฐานในการอ้างอิง วิธีการดังกล่าวเราสามารถทำได้หลายวิธี เช่น Self-organizing fuzzy logic controllers, Self-tuning fuzzy logic controllers, Adaptive fuzzy logic controllers, และ Neural network controllers เป็นต้น [1][2]

ในที่นี้จะขอกกล่าวถึง วิธีการควบคุมแบบ Self-tuning fuzzy logic controllers



รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก



รูปที่ 2 แสดงโครงสร้างของระบบควบคุมฟัซซี่ลอจิกชนิดปรับค่าด้วยตัวเอง

3. ตัวควบคุมแบบฟัซซี่ชนิดปรับค่าด้วยตัวเอง

วิธีการปรับค่าด้วยตัวเองของระบบควบคุมชนิดนี้จะใช้หลักการปรับค่าสเกลของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอินพุตโดยใช้สเกลเฟคเตอร์ ส่วนประกอบการวัดสมรรถนะของระบบจะออกแบบค่าอ้างอิงไว้ 3 ค่า คือ เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot percentage : OV), ช่วงเวลาขึ้น (Rise time : RT), เปอร์เซ็นต์การแกว่งของแอมพลิจูด (amplitude oscillation percentage : OSC) และ นำผลของการวัดมาสร้างสเกลใหม่เพื่อปรับย่านของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก [3][4]

3.1 โครงสร้างของระบบควบคุมฟัซซี่โลจิกชนิดปรับค่าด้วยตัวเอง

สำหรับโครงสร้างของระบบควบคุมฟัซซี่โลจิกชนิดปรับค่าด้วยตัวเองจะแสดงให้เห็นในรูปที่ 2

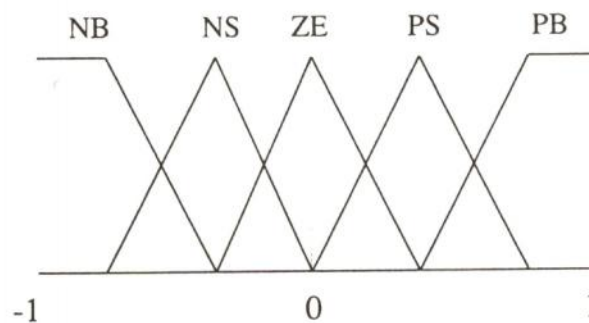
ส่วนประกอบของการควบคุมฟัซซี่โลจิกชนิดปรับค่าด้วยตัวเอง

3.2 ส่วนควบคุมแบบฟัซซี่โลจิก

ประกอบด้วย ส่วน fuzzification, knowledge base และ defuzzification

3.2.1 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอินพุตและเอาต์พุต

เราจะเลือกใช้ฟังก์ชันแบบประมาณ โดยใช้ฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยมและแบ่งกลุ่มหรือเทอมของความเป็นสมาชิกตามความเหมาะสม ในกรณีนี้แบ่งเป็น 5 เทอม คือ NB, NS, ZE, PS และ PB ตามลำดับ (ดังรูปที่ 3)



รูปที่ 3 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกในส่วนของ อินพุต และเอาต์พุต

3.2.2 กฎ

จะสร้างเป็นตารางกฎขนาด 5 x 5 (แสดงในตารางที่ 1) ประกอบด้วยค่าอินพุต 2 ค่าคือ

e = ค่าความผิดพลาด (error)

ce = อัตราการเปลี่ยนแปลงของ e

$$= e(t) - e(t-1)$$

ตารางที่ 1 แสดงกฎของระบบควบคุมชนิดปรับค่าด้วยตัวเอง

$\alpha \backslash e$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	PB	PB	PS	PS	ZE
NS	PB	PS	PS	ZE	NS
ZE	PS	PS	ZE	NS	NS
PS	PS	ZE	NS	NS	NB
PB	ZE	NS	NS	NB	NB

ตารางที่ 1 สามารถตีความได้ดังนี้ ถ้า e เป็น NS และ ce เป็น NB จะได้ du เป็น PB เป็นต้น ทำให้ได้เอาต์พุตที่เวลา t (u_t) เป็น

$$u_t = du + u_{t-1}$$

3.3 ส่วนของภาคตรวจสอบสมรรถนะ

3.3.1 การประเมินสมรรถนะ (Performance evaluation)

เป็นส่วนที่รับค่า performance 3 ค่า คือ OV, RT และ OSC จากเอาต์พุตเพื่อทำการตรวจสอบในการอนุมานแบบฟัซซี่ (fuzzy inference)

3.3.2 การอนุมานแบบฟัซซี่

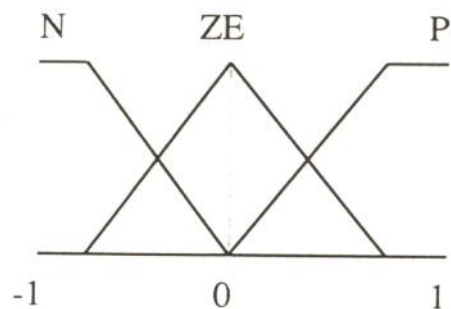
3.3.2.1 นำค่าสมรรถนะ ที่ได้จากการประเมินสมรรถนะ เปรียบเทียบกับค่าสมรรถนะ ที่ออกแบบไว้ได้ผลลัพธ์เป็นค่าที่แตกต่างกัน ดังนี้

$$\Delta OV = OV - OV_{\text{desired}}$$

$$\Delta RT = RT - RT_{\text{desired}}$$

$$\Delta OSC = OSC - OSC_{\text{desired}}$$

3.3.2.2 นำค่า ΔOV , ΔRT และ ΔOSC ไปแปลงให้เป็นค่าความเป็นสมาชิกด้วยฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (ดังรูปที่ 4)



รูปที่ 4 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกในส่วนการปรับสเกลแฟคเตอร์

3.3.3 การปรับค่าสเกลแฟคเตอร์

ให้ $s_e(t)$ เป็น ค่าสเกลแฟคเตอร์ของค่าผิดพลาดที่เวลา t และ $s_{ce}(t)$ เป็น ค่าการเปลี่ยนแปลงสเกลแฟคเตอร์ของค่าผิดพลาดที่เวลา t

$$s_e(t+1) = s_e(t) + \Delta s_e$$

$$s_{ce}(t+1) = s_{ce}(t) + \Delta s_{ce}$$

3.3.4 กฎการปรับสเกลแฟคเตอร์

จากรูปที่ 4 เราสร้างกฎหาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสมรรถนะ และ สเกลแฟคเตอร์ เช่น

กฎที่ 1 IF ΔOV เป็น P ให้ Δs_e เป็น P

กฎที่ 2 IF ΔRT เป็น Z ให้ Δs_e เป็น Z

กฎที่ 3 IF ΔOSC เป็น N ให้ Δs_e เป็น N

หรือ กฎที่ 4 IF ($\Delta OV(t) - \Delta OV(t-1)$)

เป็น P ให้ Δs_{ce} เป็น N เป็นต้น

3.4 ขั้นตอนการทำงานของระบบควบคุมชนิดปรับค่าด้วยตัวเอง

3.4.1 นำค่าที่กำหนดไว้ (set point) ผ่านกระบวนการทางพีชคณิตตามหัวข้อที่ 3.2.1-3.2.2 ในภาคควบคุมเพื่อนำผลไปควบคุมงาน (process)

3.4.2 วัดสมรรถนะ (OV, RT, OSC) จากเอาต์พุตของงานเพื่อดูผลการตอบสนอง

3.4.3 นำค่าสมรรถนะที่วัดได้เปรียบเทียบกับค่าสมรรถนะที่ออกแบบไว้

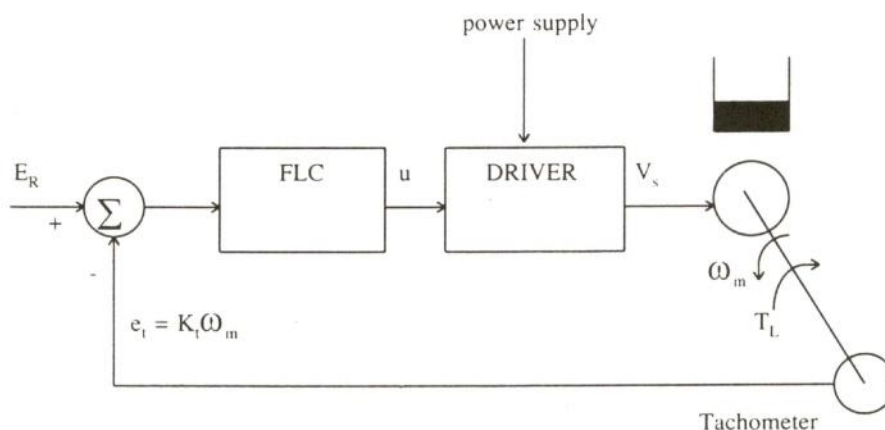
3.4.4 จากผลลัพธ์ในข้อที่ 3.4.3 ผ่านกระบวนการทางพีชคณิต เช่นเดียวกับข้อที่ 3.4.1 โดยใช้ฟังก์ชันและกฎการปรับสเกลแฟคเตอร์ (รูปที่ 4) และ

นำค่าสเกลแฟคเตอร์ที่ได้ปรับค่าสเกลของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกในภาคควบคุม

3.4.5 ค่าเอาต์พุตของงานนอกจากนำไปหาค่าสมรรถนะแล้ว ยังนำกลับมาเปรียบเทียบกับค่าอินพุตที่กำหนดไว้ เพื่อหาค่าผิดพลาด (e , ce) เพื่อเป็นค่าอินพุตในรอบต่อไป

4. ระบบควบคุมที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองเราจะสร้างตัวควบคุมพีชคณิตปรับค่าด้วยตัวเอง และใช้มอเตอร์กระแสตรงขนาด 100 วัตต์ 24 โวลต์ ความเร็วรอบที่พิกัด 3,000 รอบ/นาที ดังมีโครงสร้างดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงระบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบป้อนกลับ โดยใช้พีชคณิตลอจิก

จากรูปที่ 5 จะแบ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญ 2 ส่วน

4.1 ตัวควบคุมพีชคณิตปรับค่าด้วยตัวเอง (FLC) ควบคุมด้วยไมโครคอมพิวเตอร์ ส่งและรับข้อมูลผ่านแผ่นควบคุม A/D และ D/A

4.2 ภาคขับมอเตอร์ เป็นการควบคุมแบบชอปเปอร์ ขนาดความถี่ 10 KHz. ควบคุมแรงดันอาร์เมเจอร์ด้วย Isulate Gate Turn Off (IGBT)

4.3 ส่วนการวัดความเร็วรอบ ใช้ tachometer ชนิด 3 เฟส ผ่านวงจรเรียงกระแส

(Rectifier) และวงจรกรอง (Filter) แปลงจากความเร็วเชิงมุมของเพลามอเตอร์ (ω_m) เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรง (e_t) ด้วยสมการ

$$e_t = K_t \omega_m \quad (1)$$

จากรูปที่ 5 ให้ u เป็นแรงดันเอาต์พุตตัวควบคุมพีชคณิตปรับค่าด้วยตัวเอง, V_s เป็นแรงดันอินพุตของมอเตอร์, และ T_L เป็นแรงบิดจากโหลดทางกล

5. ขั้นตอนการออกแบบ

5.1 กำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

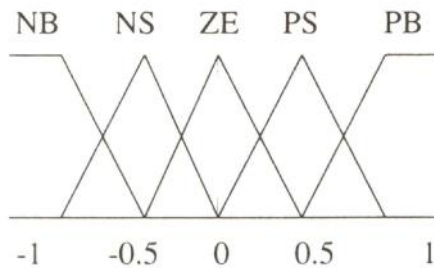
จากคุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง [5] และทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดัน อินพุตและความเร็วของมอเตอร์ ขณะไร้อหลดและขณะ มีโหลด เพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของข้อมูล และเป็นแนวทางในการเลือกชนิดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก จากสมการที่ (2), (3)

$$T = K_m i_a \quad \text{N.m} \quad (2)$$

$$e_a = K_m \omega_m \quad \text{V.} \quad (3)$$

โดย T เป็นค่าแรงบิด (นิวตัน-เมตร), e_a เท่ากับ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์ (โวลต์) K_m เป็นค่า คงที่ของอาร์เมเจอร์ และสนามแม่เหล็ก, ω_m เท่ากับ ความเร็วเชิงมุม (เรเดียน/วินาที), i_a เป็นค่ากระแส อาร์เมเจอร์ (แอมป์)

เราจะเลือกใช้ฟังก์ชันสามเหลี่ยมเป็นฟังก์ชัน ของอินพุตและเอาต์พุต (ดังรูปที่ 6)



รูปที่ 6 แสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ อินพุต

5.2 กำหนดย่านตัวแปรของฟัซซี่เซต

การกำหนดตัวแปรเราจะพิจารณาค่าอินพุต และเอาต์พุตของมอเตอร์ (รูปที่ 5)

$$\omega_m \propto e_t \quad (4)$$

$$E(t) = E_R - e_t \quad (4)$$

$$CE(t) = E(t) - E(t-1) \quad (5)$$

โดย e_t คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเอาต์พุตของ tachometer, ω_m คือ ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์, $E(t)$ คือ ค่าผิดพลาดที่เวลา t , และ E_R คือ แรงเคลื่อน ไฟฟ้าอ้างอิง

จากค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่พิกัด และ ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ กับ แรงดันเอาต์พุตของ tachometer (e_t) เราจะนำมา สร้างตารางกำหนดย่านการควบคุม (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 แสดงการกำหนดย่านตัวแปรของ ระบบควบคุม

E	CE	u	ระดับของกลุ่ม
-30	-10	๕	-5
-25	-8	4	-4
-20	-6	3	-3
-15	-4	2	-2
-10	-2	1	-1
0	0	0	0
10	2	1	1
15	4	2	2
20	6	3	3
25	8	4	4

5.3 กฎ

จากที่กล่าวแล้วเราจะนำความสัมพันธ์ต่าง ๆ ของ ค่าพารามิเตอร์มาสร้างเป็นตารางกฎ (ดังตารางที่ 3)

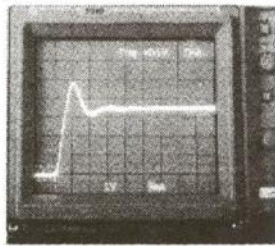
ตารางที่ 3 แสดงกฎของการควบคุมแบบฟัซซี่ ชนิดปรับค่าด้วยตัวเอง

E \ CE	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	PB	PB	PS	PS	ZE
NS	PB	PS	PS	ZE	NS
ZE	PS	PS	ZE	NS	NS
PS	PS	ZE	NS	NS	NB
PB	ZE	NS	NS	NB	NB

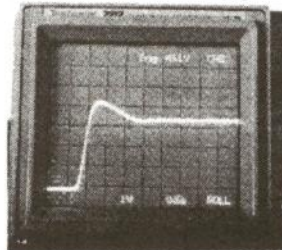
6. การทดลอง

6.1 การทดลองจะสร้างชุดทดลองตามหัวข้อที่ 4 และทดลองควบคุมความเร็วมอเตอร์โดยตรงโดยไม่ผ่านตัวควบคุมแบบฟัซซี่ชนิดปรับค่าด้วยตัวเอง เปรียบเทียบกับการใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซี่ชนิดปรับค่าด้วยตัวเอง ที่ระดับความเร็ว 1,800 รอบ/นาที, 2,000 รอบ/นาที และ 2,500 รอบ/นาที เพื่อการตอบสนอง

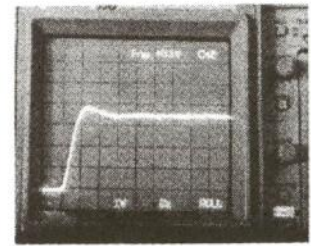
ขณะเปลี่ยนระดับ โดยจะวัดแรงดันเอาต์พุตของ tachogen ด้วย storage oscilloscope การออกแบบค่าสมรรถนะที่เหมาะสมจะใช้วิธี ITAE. [6][7] จากรูปที่ 7 เป็นรูปสัญญาณที่วัดแรงดันเอาต์พุตของ tachogen เมื่อเปลี่ยนระดับความเร็วจาก 0-2000 รอบ/นาที



ก.



ข.



ค.

- รูปที่ 7 ก. การตอบสนองของมอเตอร์ เมื่อควบคุมโดยตรง
ข. การตอบสนองของมอเตอร์ เมื่อผ่านตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดปรับค่าด้วยตัวเองรอบที่ 1
ค. การตอบสนองของมอเตอร์ เมื่อผ่านตัวควบคุมฟัซซี่ชนิดปรับค่าด้วยตัวเองรอบที่ 2

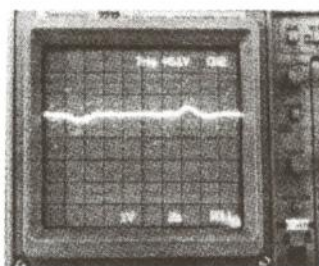
6.1.1 จากรูปที่ 7 ก. เป็นผลที่ได้จากการควบคุมแรงดันอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์โดยตรง เนื่องจากมอเตอร์ที่ทดลองมีขนาดเล็ก ค่าโมเมนต์แรงเฉื่อยมีค่าต่ำ การตอบสนองรวดเร็ว หรืออยู่ในช่วง Under damped ที่มี damping ratio ($\zeta < 0.5$) [7] ต่ำ ค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินจะมีค่าสูงและเกิดการแกว่งของแอมพลิจูด ก่อนเข้าสู่สภาวะเสถียร

6.1.2 จากรูปที่ 7 ข. เป็นผลการตอบสนองเมื่อผ่านตัวควบคุมแบบฟัซซี่ชนิดปรับค่าด้วยตัวเอง ในรอบที่หนึ่ง โดยตัวควบคุมจะตรวจสอบค่าตามที่ออก

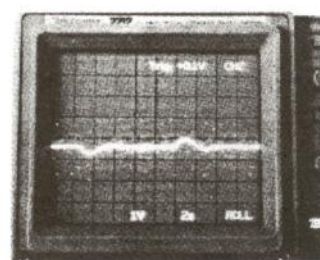
แบบไว้ และปรับค่าสเกลแฟคเตอร์เพื่อใช้ในรอบต่อไป จะเห็นว่าค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินลดลงช่วงเวลานั้นจะต่ำลง

6.1.3 จากรูปที่ 7 ค. เป็นผลในรอบที่สองจะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินลดลงมีค่าประมาณ 10%

6.2 ทดสอบจ่ายโหลดทันทีทันใด ที่ 50% และ 80% ของพิกัดมอเตอร์ (ดังแสดงในรูปที่ 8) การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลด ใช้เวลาเฉลี่ยประมาณ 2 วินาที ก่อนเข้าสู่สภาวะเสถียร เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน 6%



ก.



ข.

- รูปที่ 8 ก. แสดงการตอบสนองต่อโหลด 50% ของพิกัดมอเตอร์
ข. แสดงการตอบสนองต่อโหลด 80% ของพิกัดมอเตอร์ ที่ความเร็ว 2,500 รอบ/นาที

7. สรุปและข้อเสนอแนะ

การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซี่ชนิดปรับค่าด้วยตัวเองนั้น มีลักษณะการควบคุมคล้ายแบบ PID [8] แต่จะไม่มี ความซับซ้อนทางคณิตศาสตร์ สามารถปรับค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นได้ง่าย การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดได้รวดเร็ว เหมาะสมกับการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงในโหมต แรงบิดคงที่ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบค่าฟังก์ชัน, กฎ และ ค่าที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและขนาดของมอเตอร์ที่ใช้ ถ้าเป็นมอเตอร์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น การตอบสนองทางธรรมชาติจะต้องมีค่าโมเมนต์แรงเฉื่อย และตัวแปรทางกล ทำให้เกิดการหน่วงเวลาทางธรรมชาติ อีกประการหนึ่งการออกค่าสมรรถนะ จะต้องคำนึงถึงคือลักษณะของระบบที่จะควบคุมว่าต้องการการตอบสนองชนิดจำกัดใด เช่น ความแม่นยำทางเวลา หรือ ความแม่นยำทางระดับ เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ อาจารย์ พนาฤทธิ์ เศรษฐกุล รองผู้อำนวยการฝ่ายพัฒนาและวิจัย ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยี ไทย-ฝรั่งเศส สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ได้ให้คำปรึกษา และสนับสนุนเครื่องมือต่าง ๆ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Jun Yan, Michael Ryan, James Power, Using Fuzzy Logic, Prentice Hall International (UK) Limited, 1994.
- [2] Witold Pedrycz, Fuzzy Control and

Fuzzy Systems, Department of Electrical Engineering, University of Manitobu, Winnipeg, Canada, 1989.

- [3] Mikio Maeda, Takeo Sato, and Shuta Mirakami, Design of the self-tuning fuzzy controller, In Proceedings of the International Conference on Fuzzy Logic, and Neural Networks, pp. 393-396, July, 1990.
- [4] Chuen Chien Lee, Fuzzy logic in control System: Fuzzy logic Controller, Part II, IEEE Trans. Syst. Man Cybern., vol. 20, no. 2, pp. 419-435, March/April, 1990.
- [5] A. E. Fitzgerald Charles Kingsley, and Jr. Stephen D. Umans, Electrical Machinery, Metric Editions, 1983.
- [6] John J. D'Azzo, and Contantine H.Houpis, Linear Control System Analysis & Design Conventional and Modern, McGraw-Hill, 1988.
- [7] William A. Wolovich, Automatic Control Systems, Saunders College Publishing, 1994.
- [8] Zhen-Yu Zhao, Masayoshi Tomizuka, and Satoru Isaka, Fuzzy Gain scheduling of PID Controllers, IEEE Trans, syst. Man Cybern., vol. 23, no. 5, September/October, 1991.