

บทที่ 4

พีชชีลอจิกและระบบควบคุมแบบพีชชี

4.1 กล่าวนำ

ก่อนที่จะอธิบายถึงลักษณะของพีชชีลอจิกและพีชชีเซตจะขอทบทวนความรู้ในเรื่องเซตแบบปกติพอสังเขปดังนี้ เซต คือลักษณะนามที่เราใช้เรียกกลุ่มของสิ่งต่างๆ เช่นกลุ่มของคน, กลุ่มของสัตว์, กลุ่มของสิ่งของ เป็นต้น และสิ่งต่างๆ ที่อยู่ในกลุ่มเราเรียกว่า สมาชิก การเขียนเซตจำแนกได้ 2 แบบ คือ การเขียนแบบแจกแจงสมาชิก และการเขียนแบบบอกเงื่อนไขของสมาชิก เอกภพสัมพัทธ์ (universe of discourse) คือเซตที่กำหนดขอบเขตของสิ่งที่เราจะศึกษาและเราใช้ U เป็นสัญลักษณ์ของเอกภพสัมพัทธ์ ในเรื่องเซตเราถือว่า U เป็นเซตที่ใหญ่ที่สุดเพราะทุกๆ สิ่งที่เราต้องการศึกษาจะอยู่ใน U ทั้งสิ้น การกระทำทางเซต คือการเอาเซตหลายๆ เซตมากระทำต่อกันเพื่อให้เกิดเป็นเซตใหม่ขึ้นมาซึ่งจะมีอยู่ 3 วิธี

1. อินเตอร์เซกชัน (intersection)

$$A \cap B = \{x | x \in A \text{ และ } x \in B\}$$

2. ยูเนียน (union)

$$A \cup B = \{x | x \in A \text{ หรือ } x \in B\}$$

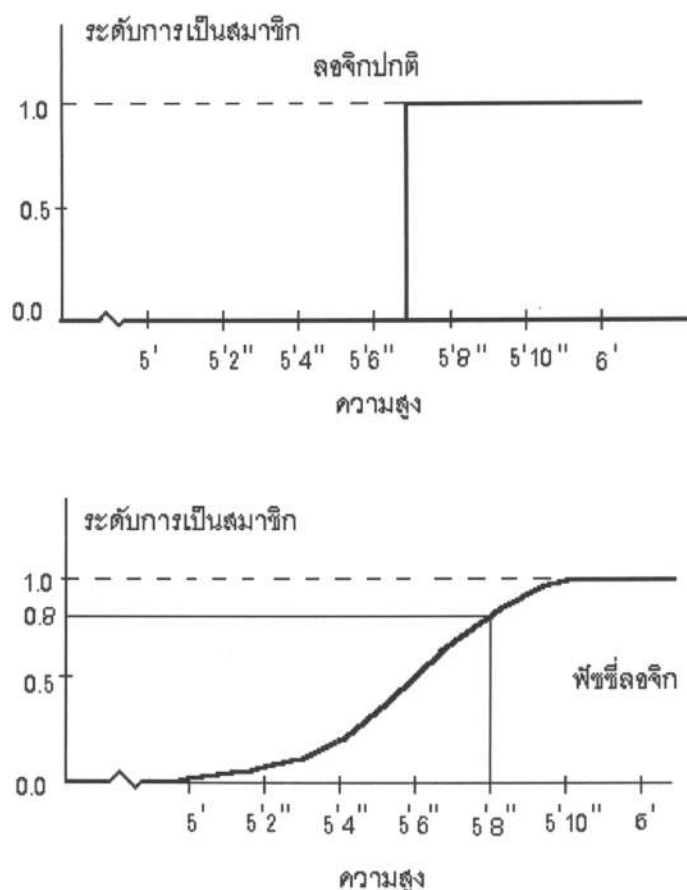
3. ผลต่างและคอมพลีเมนต์ (difference and complement)

$$A - B = \{x | x \in A \text{ แต่ } x \notin B\}$$

$$A' = A^c = \{x | x \notin A\}$$

4.2 พีชชีลอจิก (fuzzy logic)

พีชชีลอจิกกำเนิดขึ้นเมื่อปี 1965 โดย ลอตฟี ซาเดห์ (Lotfi Zadeh) พีชชีลอจิก มีพื้นฐานอยู่บนทฤษฎีพีชชีเซต หลักสำคัญของทฤษฎีพีชชีเซต คือ ขอมรับสมาชิกที่มีลักษณะตามเซตเพียงบางส่วนเข้ามาเป็นสมาชิก โดยมีการจัดค่าระดับของการเป็นสมาชิก ซึ่งแตกต่างจากทฤษฎีเซตดั้งเดิม ทฤษฎีเซตดั้งเดิมจะเน้นชัดเจนว่าเป็นสมาชิกของเซตหรือไม่เท่านั้น ไม่มีการเป็นสมาชิกเพียงบางส่วน ในลอจิกทั่วไปจะกำหนดเพียงว่าเป็น "0" เป็น "1" เป็นสมาชิกของเซตหรือไม่ หรือว่าถูกกับผิด แต่พีชชีเซตจะยอมรับสมาชิกที่มีลักษณะที่ถูกเพียงบางส่วนและผิดเพียงบางส่วน อธิบายได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบลักษณะของกราฟแสดงความเป็นสมาชิกในเซต “สูง”
ระหว่างลอจิกปกติกับฟัซซี่ลอจิกในกรณีเกี่ยวกับความสูง

จากรูปที่ 4.1 อธิบายได้ว่าถ้าคนสูง 5'8" ในลอจิกธรรมดา ค่าระดับการเป็นสมาชิกจะมีค่าเป็น "1" แต่ถ้าพิจารณาในระบบฟัซซี่ลอจิก ความสูง 5'8" จะมีค่าระดับการเป็นสมาชิกเท่ากับ 0.8 การประยุกต์ใช้ทฤษฎีฟัซซี่เซตจะต้องแสดงค่าระดับ (degree) ซึ่งเป็นค่าที่เป็นไปได้ที่จะเป็นสมาชิกของเซตเราจะใช้สัญลักษณ์ μ แทนค่าระดับการเป็นสมาชิกดังนี้

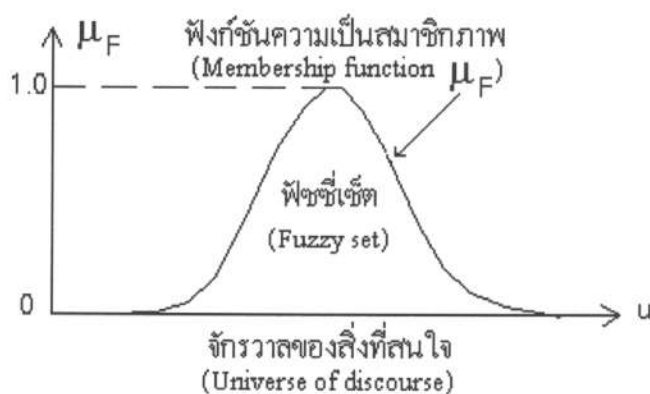
$$\mu_A(x) \rightarrow [0,1]$$

หมายความว่า ระดับการเป็นสมาชิกของ x ในฟัซซี่เซต A อยู่ในช่วง 0 ถึง 1 โดยค่า 0 จะหมายถึงไม่เป็นสมาชิกเลย และ 1 คือ เป็นสมาชิกอย่างสมบูรณ์

4.3 ทฤษฎีฟัซซีเซต (Fuzzy set theory)

4.3.1 นิยามและการใช้เครื่องหมายสัญลักษณ์

กำหนดให้ U เป็นกลุ่มของออปเจกต์ (object) เขียนแทนด้วย $\{u\}$ เรียก U ว่าเป็นเอกภพสัมพัทธ์หรือจักรวาลของสิ่งที่สนใจและแทน u เป็นองค์ประกอบที่เกิดจาก U ฟัซซีเซต F ในเอกภพสัมพัทธ์ U จะมีค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิก μ_F ซึ่งกำหนดค่าให้อยู่ในช่วง $[0,1]$ คือ $\mu_F: U \rightarrow [0,1]$ ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ฟัซซีเซตและฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ

ฟัซซีเซต F ใน U โดยปกติจะแทนด้วยคู่ลำดับขององค์ประกอบ u กับค่าระดับความเป็นสมาชิก

$$F = \{(u, \mu_F(u)) | u \in U\}$$

เมื่อ U เป็นลักษณะต่อเนื่อง (Continuous) ฟัซซีเซต F เขียนแทนด้วย

$$F = \int \mu_F(u) / u$$

เมื่อ U เป็นลักษณะไม่ต่อเนื่อง (Discrete) ฟัซซีเซต F เขียนแทนด้วย

$$F = \sum \mu_F(u_i) / u_i$$

เครื่องหมาย '+', ' $\sum$ ', และ ' $\int$ ' อ้างอิงยูเนียนเซตมากกว่าการกระทำทางคณิตศาสตร์, และเครื่องหมาย '/' เป็นการใช้ในการความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบกับค่าความเป็นสมาชิกของมันซึ่งไม่ได้หมายถึงเครื่องหมายหารทางคณิตศาสตร์

สมมติในเอกภพสัมพัทธ์ $U = \{2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$ กำหนดให้ F เป็นฟัซซีสับเซต จำนวนเต็มที่มีค่าประมาณเท่ากับ 5 อาจจะกำหนดเป็น

$$F = 0.1/2 + 0.4/3 + 0.85/4 + 1.0/5 + 0.85/6 + 0.4/7 + 0.1/8$$

ในทำนองเดียวกันฟัซซีสับเซต F ที่เป็นจำนวนเต็มใกล้เคียง 4 อาจจะกำหนดเป็น

$$F=0.4/2 + 0.8/3 + 1/4 + 0.8/5 + 0.4/6 + 0.1/7 + 0.0/8$$

ซัพพอร์ทเซต (Support set) จุดตัดข้าม (crossover point) ฟัซซี่ซิงเกิลตัน (fuzzy singleton)

ซัพพอร์ทเซตของฟัซซี่เซตคือคลิเซตของจุด u ทั้งหมดใน U โดยที่ $\mu_F(u) > 0$ ส่วนองค์ประกอบ u ใน U ที่มี $\mu_F(u) = 0.5$ จะถูกเรียกว่า 'จุดตัดข้าม' ฟัซซี่เซตที่มีตัวซัพพอร์ทเพียงตัวเดียวใน U จะถูกเรียกว่าเป็น 'ฟัซซี่ซิงเกิลตัน'

เซต α -cut ของฟัซซี่เซต (α -cut set of a fuzzy set)

เซต α -cut ของฟัซซี่เซต F (F_α) คือ คลิเซตของ u ทั้งหมดใน U โดยที่ $\mu_F(u) \geq \alpha$ ข้อสังเกตก็คือเซต α -cut จะตัดสมาชิกจุดที่ค่าความเป็นสมานิกน้อยกว่า α

นอร์แมลไลเซชัน (Normalization)

โดยปกติการระดับการเป็นสมานิกสูงสุดสำหรับองค์ประกอบในฟัซซี่เซตคือค่า 1 เซตซึ่งยังไม่ได้ทำการนอร์แมลไลซ์ (normalized) สามารถที่จะทำได้โดยเปลี่ยนค่าความเป็นสมานิกทั้งหมดในสัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อที่จะทำให้ได้ค่าความเป็นสมานิกสูงสุดเป็นค่า 1

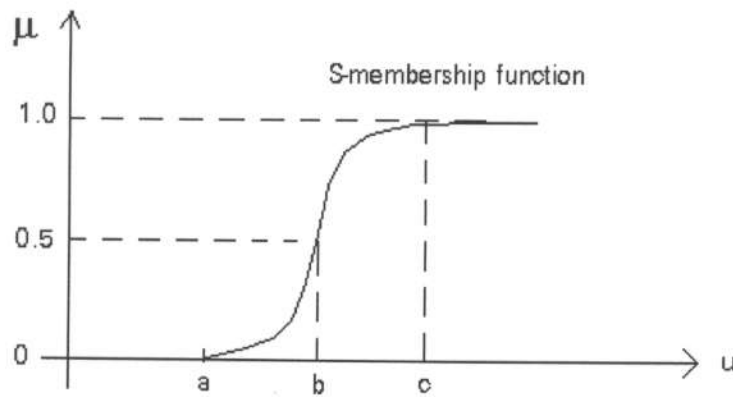
ฟังก์ชันความเป็นสมานิก

ค่าความเป็นสมานิกสำหรับฟัซซี่เซตมีการกำหนดอยู่ 2 แบบ คือ แบบเชิงตัวเลขและแบบเชิงฟังก์ชัน การกำหนดเชิงตัวเลขเป็นการแสดงระดับของฟังก์ชันความเป็นสมานิกของฟัซซี่เซตในรูปเวกเตอร์ตัวเลข ซึ่งขนาดของเวกเตอร์ขึ้นอยู่กับความไม่ต่อเนื่องของสมานิกในเอกภพ (universe) การกำหนดเชิงฟังก์ชัน เป็นการหาค่าความเป็นสมานิกของฟัซซี่เซตในรูปของสมการที่คำนวณได้โดยทั่ว ๆ ไปฟังก์ชันความเป็นสมานิก ที่ใช้ในทางปฏิบัติจะกำหนดในรูปของ S-ฟังก์ชัน, π -ฟังก์ชัน, รูปของสามเหลี่ยม, รูปของสี่เหลี่ยมคางหมู, รูปเอ็กซ์โพเนนเชียล

S-ฟังก์ชัน ถูกกำหนดเป็นดังนี้

$$S(u; a, b, c) = \begin{cases} 0 & \text{for } u < a \\ 2[(u-a)/(c-a/2)]^2 & \text{for } a \leq u \leq b \\ 1-2[(u-c)/(c-a)]^2 & \text{for } b \leq u \leq c \\ 1 & \text{for } u > c \end{cases}$$

ฟังก์ชันในรูป S นี้จะถูกกำหนดโดยพารามิเตอร์ a, b, c , ดังแสดงในรูปที่ 4.3 สังเกตได้ว่าถ้า $u \leq a$ S-ฟังก์ชันจะราบแบนเป็นค่า 0 คงที่ ถ้า $u \geq a$ S-ฟังก์ชันจะมีค่าเป็น 1 คงที่ ส่วนในระหว่าง a กับ c S-ฟังก์ชันจะเป็นฟังก์ชันควอดเรติก (quadratic) ของ u จุดที่เป็นจุดตัดข้าม $\mu(u) = 0$. ปรากฏที่จุด $b=(a+c)/2$

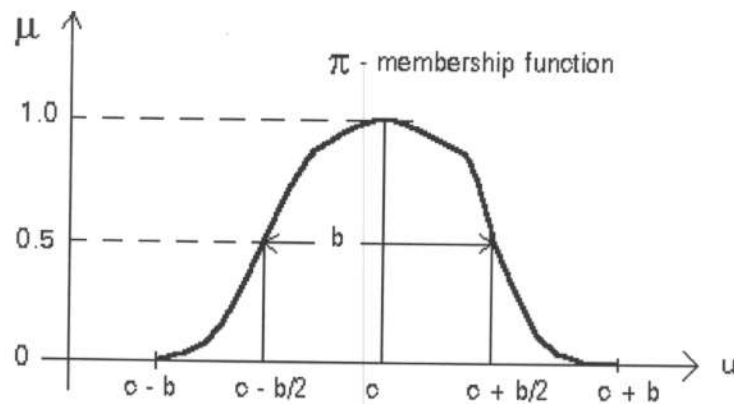


รูปที่ 4.3 ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ S-ฟังก์ชัน

π -ฟังก์ชัน ถูกกำหนดเป็นดังนี้

$$\pi(u; b, c) = \begin{cases} S(u; c-b, c-b/2, c) & \text{for } u \leq c \\ 1 - S(u; c, c+b/2, c+b) & \text{for } u \geq c \end{cases}$$

ฟังก์ชันนี้มีรูปลักษณ์คล้ายกับระฆัง ซึ่งขนาดรูประฆังจะเกิดจาก S-ฟังก์ชัน ดังแสดงในรูปที่ 4.4 สังเกตได้ว่าพารามิเตอร์ b เป็นขนาดความกว้างของจุดตัดข้าม π -ฟังก์ชันจะเข้าใกล้ค่า 0 ที่จุด $u = c \pm b$ และจุดตัดข้ามอยู่ที่ $u = c \pm b/2$

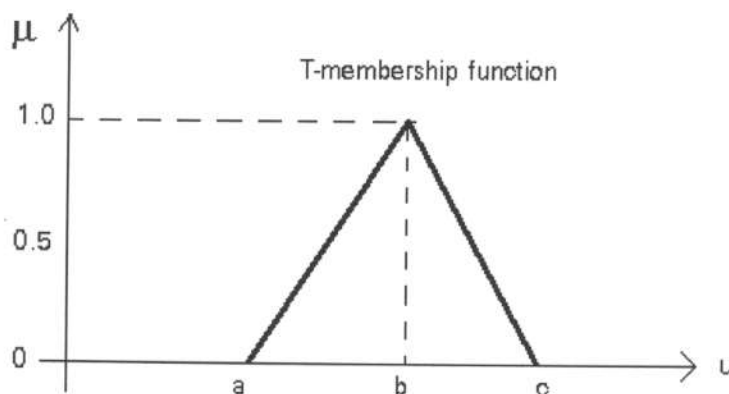


รูปที่ 4.4 ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ π -ฟังก์ชัน

ฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยม ถูกกำหนดเป็นดังนี้

$$T(u; a, b, c) = \begin{cases} 0 & \text{for } u < a \\ (u-a)/(b-a) & \text{for } a \leq u \leq b \\ (c-u)/(c-b) & \text{for } b \leq u \leq c \\ 0 & \text{for } u > c \end{cases}$$

ฟังก์ชันที่เป็นรูปสามเหลี่ยมซึ่งปรากฏตามพารามิเตอร์ a, b, c , ดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยทั่ว ๆ ไป ฟังก์ชันนี้จะถูกใช้ในการ โมเดลลิง (modeling) ซึ่งค่าความเป็นสมาชิกที่ไม่เป็น 0 จะอยู่ที่ขนาดของ u แคบ ๆ เท่านั้น



รูปที่ 4.5 ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยม

4.3.2 ปฏิบัติการทางคณิตศาสตร์ภายใต้ฟัซซี่เซต (Fuzzy set operations)

กำหนดให้ A และ B เป็นเซตของฟัซซี่ในเอกภพสัมพัทธ์ U ซึ่งมีค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็น $\mu_A(u)$ และ $\mu_B(u)$ ตามลำดับ เราสามารถกำหนดการกระทำทางฟัซซี่ได้ดังนี้

ความเท่ากัน (Equality)

ฟัซซี่เซต A และ B จะเท่ากันก็ต่อเมื่อทั้ง A และ B อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์เดียวกันและมีค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเท่ากัน

$$\mu_A(u) = \mu_B(u) \quad \text{for all } u \in U$$

ยูเนียน

ยูเนียนของฟัซซี่เซต A และ B ที่ประกอบด้วยค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิก $\mu_A(u)$ และ $\mu_B(u)$ คือฟัซซี่เซตซึ่งมีค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิก $\mu_{A \cup B}(u)$ กำหนดโดย

$$\mu_{A \cup B}(u) = \max\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} \quad \text{for all } u \in U$$

อินเตอร์เซกชัน

อินเตอร์เซกชันของฟัซซี่เซต A และ B คือฟัซซี่เซตซึ่งมีค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่กำหนดโดย

$$\mu_{A \cap B}(u) = \min\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} \quad \text{for all } u \in U$$

คอมพลิเมนต์

คอมพลิเมนต์ของฟัซซีเซต A (ที่นอร์เมลไลซ์แล้ว) ที่มีค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิก $\mu_A(u)$ ถูกกำหนดเป็นฟัซซีเซตที่อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์เดียวกันที่มีค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเท่ากับ

$$\mu_{A'}(u) = 1 - \mu_A(u) \quad \text{for all } u \in U$$

นอร์เมลลิเซชัน

การนอร์เมลลิเซชันเป็นการทำให้ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของระบบฟัซซีที่มีค่าสูงสุดคือ 1 นั่นคือ

$$\mu_{\text{NORM}(A)} = \mu_A(u) / \max(\mu_A(u)) \quad u \in U$$

คอนเซนเทรชัน (Concentration)

ฟัซซีเซต A สามารถที่จะทำการ ‘คอนเซนเทรต (concentrated)’ โดยการเปลี่ยนค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของมันเพื่อที่จะเน้นค่าความเป็นสมาชิกขององค์ประกอบที่มีค่าความเป็นสมาชิกสูงกว่า นั่นคือ

$$\mu_{\text{CON}(A)}(u) = (\mu_A(u))^2 \quad \text{for all } u \in U$$

ดิเลชัน (Dilation)

ฟัซซีเซต A สามารถที่จะ ‘ดิเลท (dilated)’ โดยการเปลี่ยนแปลงค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของมันเพื่อที่จะเพิ่มสำคัญขององค์ประกอบที่มีค่าความเป็นสมาชิกต่ำกว่า ซึ่งทำได้โดยการถอดรากที่สองของค่าความเป็นสมาชิกที่นอร์เมลไลซ์แล้ว นั่นคือ

$$\mu_{\text{DIL}(A)}(u) = (\mu_A(u))^{0.5} \quad \text{for all } u \in U$$

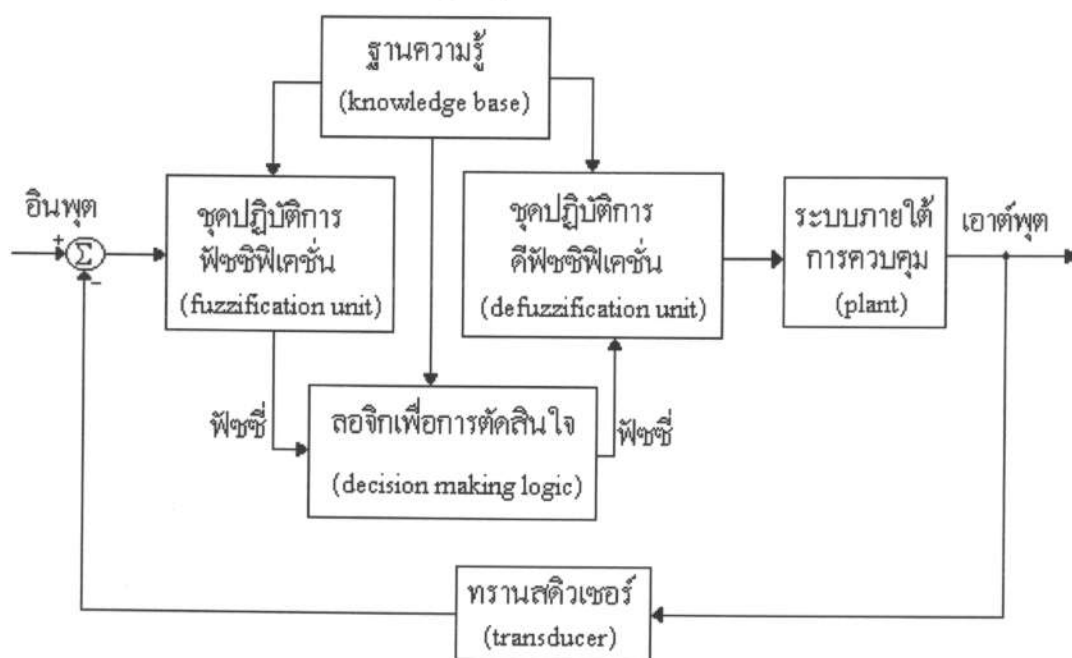
อินเทนซิฟิเคชัน (Intensification)

การกระทำนี้จะนอร์เมลไลซ์ฟัซซีเซตให้ใกล้เคียงคลิซที่เป็นอยู่ โดยการเพิ่มค่าความเป็นสมาชิกขององค์ประกอบที่มีค่าความเป็นสมาชิกมากกว่า 0.5 และจะลดค่าความเป็นสมาชิกเมื่อองค์ประกอบที่มีค่าความเป็นสมานิชน้อยกว่า 0.5 กำหนดโดย

$$\mu_{\text{INT}(A)}(u) = \begin{cases} 2(\mu_A(u))^2 & \text{for } 0 \leq \mu_A(u) \leq 0.5 \\ 1 - 2(1 - \mu_A(u))^2 & \text{for } 0.5 \leq \mu_A(u) \leq 1 \end{cases} \quad \text{for all } u \in U$$

4.4 ระบบควบคุมแบบฟัซซี่

เมื่อก้าวถึงระบบควบคุมแบบฟัซซี่ (สราวุฒ, 1996) ในปัจจุบันเราหมายถึงระบบควบคุมที่มีการใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก หรือที่เรียกโดยย่อว่า FLC รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะพื้นฐานของระบบควบคุมแบบฟัซซี่ ซึ่งจะเห็นว่าตัวควบคุมแบบฟัซซี่หรือ FLC มีองค์ประกอบหลักอยู่ 4 ส่วน ได้แก่ ชุดปฏิบัติการฟัซซี่ฟิเคชัน (fuzzification unit) ฐานความรู้ (knowledge base) ลอจิกเพื่อการตัดสินใจ (decision making logic) และชุดปฏิบัติการดีฟัซซี่ฟิเคชัน (defuzzification unit)



รูปที่ 4.6 รูปลักษณะพื้นฐานของระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก

ชุดปฏิบัติการฟัซซี่ฟิเคชัน ทำหน้าที่แปลงสัญญาณข้อมูลแบบธรรมดาให้ไปอยู่ในรูปของตัวแปรภาษา หรือตัวแปรฟัซซี่ ซึ่งเป็นการแปลงข้อมูลทางด้านอินพุต บางครั้งอาจพบว่า เมื่อก้าวถึงชุดปฏิบัติการฟัซซี่ฟิเคชัน ผู้พูดหมายรวมเอาชุดวัดสัญญาณด้วยทรานสดิวเซอร์และชุดเปรียบเทียบสัญญาณไว้ในส่วนที่เป็นชุดปฏิบัติการฟัซซี่ฟิเคชันนี้ด้วย ฐานความรู้ ประกอบด้วยส่วนที่เป็นฐานข้อมูล (data base) และฐานกฎการควบคุม (control rule base) ส่วนที่เป็นฐานข้อมูลนั้นให้นิยามต่างๆ ที่ใช้กำหนดกฎการควบคุมแบบตัวแปรทางภาษา และบ่งบอกข้อมูลแบบฟัซซี่ต่าง ๆ สำหรับตัวควบคุมแบบฟัซซี่ ส่วนที่เป็นฐานกฎการควบคุมนั้นเป็นศูนย์รวมของกฎการควบคุมแบบตัวแปรทางภาษา ซึ่งแสดงถึงแนวทางการควบคุมให้ระบบมีพฤติกรรมตามต้องการ ลอจิกเพื่อการตัดสินใจ เป็นส่วนที่ให้การเรียนแบบการตัดสินใจของมนุษย์ โดยอาศัยแนวความคิดทางคณิต

ศาสตร์และการอนุมานแบบฟัซซี่ ชุดปฏิบัติการดีฟัซซิฟิเคชัน ทำหน้าที่แปลงข้อมูลแบบฟัซซี่ ไปเป็นตัวแปรแบบธรรมดา (conventional variable) ที่สมนัยกัน เพื่อให้ระบบภายใต้การควบคุมสามารถเข้าใจสัญญาณดังกล่าวได้ ข้อมูลแบบฟัซซี่ที่กล่าวถึงข้างต้นเป็นข้อมูลที่ได้จากการอนุมานกฎการควบคุมแบบฟัซซี่ต่าง ๆ

4.4.1 การออกแบบและการอนุมานระบบควบคุมแบบฟัซซี่

การออกแบบและการอนุมานระบบควบคุมฟัซซี่มิได้ยุ่งยากซับซ้อนใด ๆ เลย เพียงแต่ผู้ปฏิบัติมีความเข้าใจในขั้นตอนอย่างถูกต้องก็สามารถปฏิบัติได้ไม่ยากนัก ก่อนอื่นเราจะต้องเข้าใจว่าระบบภายใต้การควบคุมนั้น เป็นระบบทางกายภาพที่มีมีความเป็นฟัซซี่ใด ๆ นั้นหมายความว่าสถานะ (state) ของระบบแสดงได้ด้วยตัวแปรแบบธรรมดา (conventional variables) คราวนี้เราคงจะถามต่อไปว่า แล้วระบบควบคุมแบบฟัซซี่หรือ FLC เข้าามีประโยชน์ตรงไหน หรือหาช่องว่างแทรกตัวเข้ามาให้เกิดประโยชน์อย่างไร คำตอบสำหรับคำถามนี้ก็คือ มนุษย์มิได้มีความรู้ลึกซึ้งเกี่ยวกับฟิสิกส์ของระบบทั้งมวลที่มีอยู่ในโลก มนุษย์จึงไม่สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical models) ด้วยวิธีแบบอมตะต่าง ๆ ให้กับระบบได้ทุกประเภท ในบางกรณีระบบที่มนุษย์สนใจนั้นมีความยุ่งยากซับซ้อนมากเกินไปจนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต้องใช้เวลา นาน จนอาจกล่าวได้ว่าเป็นการได้ไม่คุ้มเสีย เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นเหมือนหัวใจของการวิเคราะห์และออกแบบระบบด้วยวิธีแบบอมตะต่างๆ ในการประยุกต์ที่ขาดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ วิธีการแบบอมตะต่างๆ ก็พลอยขาดการใช้ประโยชน์ไปด้วย FLC ได้รับการนำมาใช้ประโยชน์ในกรณีที่ขาดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบอมตะ ไม่ว่าจะด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น หรือเป็นเพราะว่ามนุษย์เพิกเฉยต่อการหาแบบจำลองนั้น

การทำงานภายใน FLC อาศัยคณิตศาสตร์แบบฟัซซี่และตัวแปรแบบฟัซซี่ทั้งสิ้น เมื่อ FLC จะต้องเกี่ยวข้องกับระบบทางกายภาพที่ไม่เป็นฟัซซี่ ตัวแปรต่างๆ ที่ไม่เป็นฟัซซี่ ได้แก่ เอาต์พุตของกระบวนการหรือระบบภายใต้การควบคุม อินพุตอ้างอิง เป็นต้น จะต้องผ่านกระบวนการทำให้เป็นฟัซซี่ด้วยฟัซซี่โอเพอเรเตอร์ (fuzzy operator) ที่เรียกว่า ฟัซซิฟายเออร์ (fuzzifier) ผลของการอนุมานที่ได้จาก FLC ซึ่งจะไปบังคับควบคุมกระบวนการอยู่ในรูปของตัวแปรฟัซซี่ ซึ่งระบบหรือกระบวนการภายใต้การควบคุมนั้นไม่สามารถเข้าใจได้ ตัวแปรฟัซซี่ดังกล่าวจึงต้องผ่านกระบวนการทำให้ไม่เป็นฟัซซี่ ด้วยโอเพอเรเตอร์ชนิดดีฟัซซิฟายเออร์ (defuzzifier) หรือดีฟัซซิฟิเคชันโอเพอเรเตอร์ (defuzzification operator)

การออกแบบ FLC จึงต้องคำนึงถึงพารามิเตอร์หลักๆดังต่อไปนี้

- 1) วิธีการฟัซซิฟิเคชันและการตีความของฟัซซิฟายเออร์

2) ฐานข้อมูล ซึ่งจะต้องคำนึงถึง

- ยูนิเวิร์ส: การกำหนด การแบ่งส่วน และการนอร์มัลไลซ์
- การกำหนดช่วงอินพุต เอาต์พุต ให้เหมาะสมสอดคล้องกับการแบ่งส่วนตัวแปรแบบฟัซซี่
- ความครบถ้วน
- ลักษณะของฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ

3) ฐานกฎ ซึ่งจะต้องคำนึงถึง

- การเลือกตัวแปรสถานะ (อินพุต) และตัวแปรควบคุม (เอาต์พุต) สำหรับกฎการควบคุม
- แหล่งที่มาและการสังเคราะห์กฎการควบคุม
- ชนิดของกฎการควบคุมแบบฟัซซี่
- ความครบถ้วน ความสอดคล้องกันอย่างเสมอดันเสมอปลาย และอันตรกิริยาระหว่างกฎการควบคุม

4) ลอจิกเพื่อให้การตัดสินใจ ซึ่งเราจะต้องคำนึงถึงสิ่งต่อไปนี้

- นิยามของฟัซซี่อิมพลีเคชัน (fuzzy implication)
- การตีความค่าเชื่อมประโยคแบบ and
- การตีความค่าเชื่อมประโยคแบบ also
- นิยามของคอมโพสิชันนัลโอเพอเรเตอร์ (compositional operator)
- กลไกการอนุมาน (inference mechanism)

5) วิธีการดีฟัซซิฟิเคชันและการตีความดีฟัซซิฟายเออร์

จากพารามิเตอร์หลัก 5 ประการข้างต้น สิ่งที่จะเป็นปัญหามากที่สุดในงานออกแบบและอนุวัต FLC คือ การสังเคราะห์กฎการควบคุม การเลือกฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพที่เหมาะสม การอนุมาน และการดีฟัซซิฟิเคชัน

4.4.2 การกำหนดฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ

การเลือกฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพที่เหมาะสมนั้น ทางปฏิบัติที่พบมากที่สุดเป็นการกำหนดจากประสบการณ์ และความรู้เดิมของผู้ออกแบบมีอยู่ก่อนแล้ว หรือที่เรียกว่าศึกษาสำนึก (heuristic approach) ค่าแสดงสมาชิกภาพที่ได้จึงมีลักษณะเป็นแบบอัตวิสัย (subjective) ขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบ FLC เป็นรายๆ ไป การกำหนดอาจใช้รูปแบบจุด กล่าวคือ

$$\mu(u) = \sum_{i=1}^6 c_i / u_i \quad \text{ซึ่ง}$$

$c = [0.1, 0.3, 0.6, 0.8, 0.95, 1.0]$ เป็นต้น

u_i หมายถึงองค์ประกอบในฟัซซี่เซต

การกำหนดฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพด้วยวิธีการอติวิสัยนั้น เป็นสิ่งที่ใช้ประโยชน์มากับระบบฟัซซียนานนับสิบปี คำถามหนึ่งที่มีเกิดขึ้นเสมอก็คือสำหรับตัวแปรฟัซซี่กลุ่มเดียวกัน ผู้ใช้งานสองคนหรือมากกว่าอาจกำหนดฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพที่แตกต่างกันอย่างสิ้นเชิงได้หรือไม่ คำตอบต่อคำถามดังกล่าวนี้คือมีความเป็นไปได้ หากระบบที่มนุษย์กำลังสนใจอยู่นั้นเป็นระบบที่ใหม่ถอดด้าม การกำหนดฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพด้วยวิธีศึกษาสำนึกหรืออติวิสัยนี้สร้างความลำบากให้แก่ผู้ออกแบบเสมอ เพราะไม่มีผู้ใดเลยที่มีความรู้เข้าใจระบบมาก่อน

4.4.3 การสังเคราะห์กฎการควบคุม

กรณีที่มีผู้ชำนาญการเกี่ยวกับระบบที่ทำการควบคุมนั้น กฎการควบคุมสามารถได้รับการเขียนขึ้นเป็นประโยคแสดงการพยายามควบคุมกับผลที่เกิดขึ้นกับการตอบสนองของระบบ โดยอาศัยความรู้ความชำนาญของมนุษย์เป็นหลัก ดังตัวอย่างของกฎการควบคุมกระบวนการทางอุตสาหกรรม เช่น

ถ้า [ความดันภายในท่อ A เพิ่มขึ้นไม่มากนัก] แล้ว [ให้ลดปริมาณไอน้ำที่ไหลเข้าทางจุด X ลงบ้างเล็กน้อย]

ถ้า [ความดันในท่อยังคงลดลงไม่มากเท่าที่ควร] แล้ว [ให้ลดปริมาณไอน้ำที่ไหลเข้าทางจุด Y เป็น 2 เท่าของการลดปริมาณไอน้ำที่จุด X ซึ่งเพิ่งปฏิบัติผ่านมา] ดังนี้ เป็นต้น

การสังเคราะห์กฎการควบคุมด้วยวิธีนี้ เป็นวิธีการแบบศึกษาสำนึก ซึ่งมีข้อจำกัดที่ว่า ถ้าเป็นระบบใหม่ เรายังไม่อาจหาผู้ใดที่มีความชำนาญในระบบนั้นได้ เราก็จะไม่สามารถสังเคราะห์กฎการควบคุมได้ อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันได้มีผู้นำเสนอวิธีการต่างๆ ที่ใช้ผลิตกฎการควบคุมโดยไม่ต้องอาศัยผู้ที่มีความชำนาญในเรื่องระบบที่เกี่ยวข้อง ตัวอย่างหนึ่งของวิธีการเหล่านี้ได้แก่ วิธีการ FARMA (ชื่อเต็มคือ Fuzzy Auto-Regressive Moving Average Model) ซึ่งนำเสนอโดย Park และคณะ ตัวควบคุมแบบ FARMA ไม่ต้องอาศัยมนุษย์ผู้ชำนาญการในการผลิตกฎการควบคุม หากแต่ใช้ข้อมูลที่ผ่านมาของอินพุตและเอาต์พุตของระบบ เมื่อตัวควบคุมเริ่มทำงานในระยะแรกจะไม่มีกฎการควบคุมอยู่เลย แต่จะสร้างกฎขึ้นมาเองโดยใช้ข้อมูลอินพุต-เอาต์พุตเก่าที่ผ่านมา และสะสมกฎที่สร้างขึ้นไว้ในหน่วยความจำ เทคนิคการสร้างกฎนั้นคล้ายกับ ARMA (หรือชื่อเต็มว่า Auto-Regressive Moving Average) ในอนุกรมเวลา (time-series) การควบคุมระบบที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะลองผิดลองถูก และทำการจดจำพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ให้ผลดีต่อการควบคุม ทำการปรับแก้ฐานกฎการ

ควบคุมด้วยตัวเองได้ในระดับหนึ่ง คณะผู้นำเสนอได้จำลองผลวิธีการควบคุมดังกล่าวกับระบบพลวัตที่เป็นลูกตุ้มนาฬิกากลับหัวอยู่บนล้อเลื่อน ปรากฏว่าให้ผลการควบคุมเป็นที่น่าพอใจ

4.4.4 รูปแบบการอนุมาน

การอนุมาน (inference) หมายถึงการเอ็กซ์ทราโพลีเทชันนเอง ในระบบควบคุมแบบฟัซซี่ ได้พบว่าเทคนิคการอนุมานมีสองลักษณะกล่าวคือ ลักษณะที่หนึ่งเป็นการอนุมานกฎการควบคุม แยกจากกันแต่ละกฎ โดยทำการอนุมานทุกกฎ และนำผลการอนุมานที่ได้จากกฎแต่ละกฎมารวมกันค่าว่ารวมกันในที่นี้ มิได้หมายถึงการรวมกันทางพีชคณิต หากแต่ต้องใช้เทคนิคใดนั้นผู้ออกแบบจะทำการเลือกเทคนิคการรวมผลการอนุมานที่ตนคิดว่าเหมาะสม เช่น อาจเป็นการหาค่าเฉลี่ยแบบฟัซซี่ เป็นต้น โดยปกติ ระบบควบคุมแบบฟัซซี่เวลาจริง (real-time fuzzy control) ใช้กฎการควบคุมเพียงไม่กี่กฎ เท่าที่พบเห็นจะใช้จำนวนกฎ 10-40 กฎโดยประมาณ ดังนั้น การเก็บสะสมกฎเหล่านี้ไว้ในหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ จึงมิได้ต้องการเนื้อที่หน่วยความจำมากมายอะไร การเอ็กซ์ทราโพลีเทชันนเหล่านี้ด้วยวิธีการแบบฟัซซี่จนครบทุกกฎ ก็ใช้เวลาเป็นเพียงไมโครวินาทีเท่านั้น จึงพบได้เสมอว่าเทคนิคการอนุมานเช่นนี้ เป็นที่นิยมใช้ในกลุ่มผู้ออกแบบ FLC เทคนิคการอนุมานลักษณะที่สองเป็นการอนุมานแบบรวมกฎ เทคนิคการอนุมานนี้ใช้วิธีคำนวณเมตริกซ์ความสัมพันธ์ (relational matrix) ซึ่งเป็นตัวแทนเพื่อการอนุมานของกฎทุกกฎ FLC ทำการคำนวณโดยตรงกับเมตริกซ์ความสัมพันธ์นี้เพื่อให้ผลการอนุมาน ในทางปฏิบัติผู้ออกแบบ FLC จะต้องทำการคำนวณเมตริกซ์ความสัมพันธ์นี้เก็บไว้เสียก่อน ซึ่งมักจะใช้ภาษาสูงในการโปรแกรมทำการคำนวณ จากนั้นจึงเก็บเมตริกซ์ดังกล่าวไว้ในหน่วยความจำ เพื่อใช้ประโยชน์ในการคำนวณเวลาจริง ในกรณีที่ตัวแปรเกี่ยวข้องกับการควบคุมมีจำนวนหลายตัวแปร เมตริกซ์ดังกล่าวจะเป็น n -มิติ (n -dimensional matrix) การจัดเก็บเมตริกซ์เช่นนี้ลงหน่วยความจำมาตรฐาน เช่น ROM กระทำได้ยากยิ่ง ต้องอาศัยเทคนิคการจัดแอดเดรสเข้าช่วยอย่างมาก และสิ้นเปลืองเนื้อที่หน่วยความจำ นอกจากนั้นยังได้พบว่า ถ้าจำนวนกฎมีมาก เมตริกซ์ความสัมพันธ์ที่คำนวณได้ก็จะมีขนาดใหญ่มาก กล่าวคือจะมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 แพร่กระจายอยู่เต็มเมตริกซ์ทำให้ผลการอนุมานโดยอาศัยเมตริกซ์ดังกล่าว ขาดความแม่นยำไปมากจึงพบว่าลักษณะการอนุมานแบบที่สองนี้ไม่ค่อยเป็นที่นิยมมากนักในการออกแบบ FLC

4.4.5 เทคนิคของการดีฟัซซิฟิเคชัน

เอาต์พุตจากกระบวนการอนุมานจะอยู่ในรูปของฟัซซี่เซต ซึ่งเป็นการบ่งบอกถึงการกระจายความเป็นไปได้ (possibility distribution) ของการควบคุมที่จะสั่งการควบคุมไปยังกระบวนการ

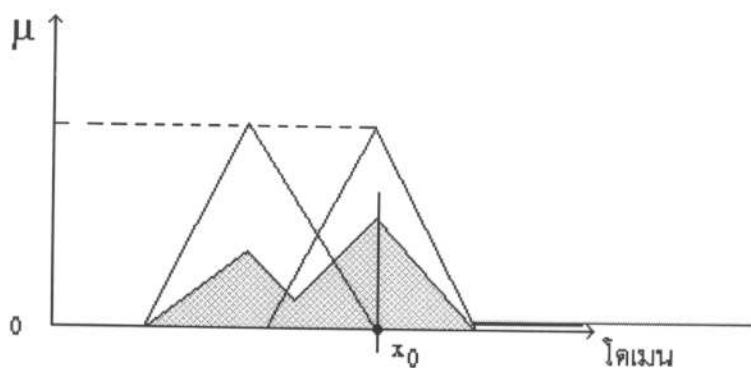
การ เราต้องการสัญญาณสั่งการที่ไม่ใช่ฟัซซี่ (nonfuzzy or crisp control signal) ดังนั้นกระบวนการดีฟัซซิฟิเคชันเพื่อเปลี่ยนฟัซซี่เซตไปเป็นเอาต์พุตที่ไม่ใช่ฟัซซี่ จึงเป็นสิ่งจำเป็น เมื่อ x_0 เป็นสัญญาณการควบคุมแบบธรรมดา และ x เป็นฟัซซี่เซตของคำสั่งการควบคุม

$$x_0 = \text{defuzzifier}(x)$$

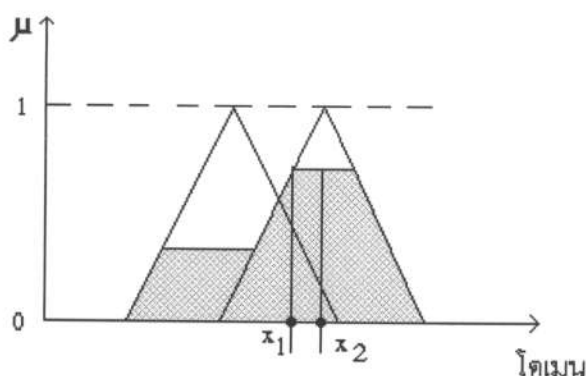
defuzzifier จึงเป็นดีฟัซซิฟิเคชันโอเปอเรเตอร์ (defuzzification operator)

เทคนิคดีฟัซซิฟิเคชันที่ได้รับการใช้งานมีอยู่หลายเทคนิค ต่างก็ให้เอาต์พุต x_0 ที่ไม่เท่ากันจนถึงปัจจุบัน การเลือกใช้เทคนิคใดนั้นขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบเป็นสำคัญ ในการพิจารณาเลือกใช้มักจะคำนึงถึงความยุ่งยากซับซ้อนในการคำนวณ สำหรับระบบควบคุมแบบเวลาจริงการคำนวณไม่ควรจะยุ่งยาก และการใช้หน่วยความจำจะต้องเป็นไปอย่างจำกัด เทคนิคดีฟัซซิฟิเคชันที่ได้รับการใช้งานกันกว้างขวางได้แก่ วิธีแบบเกณฑ์สูงสุด (max criterion) วิธีหาค่าเฉลี่ยของค่าสูงสุด (mean of maximum) และวิธีแบบศูนย์กลางของพื้นที่ (center of area)

วิธีแบบเกณฑ์สูงสุดจะให้เอาต์พุตที่มีค่าการกระจายของความเป็นไปได้สูงสุดเป็นค่าที่นำไปสั่งการควบคุม ในกรณีที่ผลการอนุมานให้ฟัซซี่เซตแทนการกระจายความเป็นไปได้ที่เป็นแบบลดสัดส่วน (scaled fuzzy sets) ดังในรูปที่ 4.7 ผลการดีฟัซซิฟิเคชันก็ให้ค่า x_0 ในโดเมน หากว่าการอนุมานกฎการควบคุมให้ฟัซซี่เซตแบบตัดส่วน (clipped fuzzy sets) อาจทำให้มีค่าความเป็นไปได้สูงสุดหลายค่าดังที่แสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 ดีฟัซซิฟิเคชันแบบเกณฑ์สูงสุดเมื่อปฏิบัติกับผลการอนุมานที่ได้เป็นฟัซซี่เซตชนิดลดสัดส่วน



รูปที่ 4.8 คีฟัซซึฟิเคชันแบบเกนซ์สูงสุดเมื่อปฏิบัติกับผลการอนุมานที่ได้เป็นฟัซซี่เซตชนิดตัดส่วน

ในกรณีดังกล่าวแนวทางในการหาผลคีฟัซซึฟิเคชันมี 2 ลักษณะ ได้แก่ การเลือกค่าโดเมนที่มีความเป็นไปได้ (μ) สูงสุดค่าแรก ที่ค้นหาค้นพบจากการค้นหาค่าโดเมนจากน้อยไปมาก เมื่อพิจารณาวิธีนี้ประกอบรูปที่ 4.8 จะพบว่า ในกรณีแรกนี้ค่า $x_0 = x_1$ อีกลักษณะหนึ่งเป็นการใช้ค่าเฉลี่ยของค่า x ต่างๆ ในโดเมนที่พบว่ามีค่า μ สูงสุด นั่นคือ ผลการคีฟัซซึฟิเคชัน

$$x_0 = \sum_{j=1}^k \frac{x_j}{k}$$

ซึ่งลักษณะที่สองที่กล่าวถึงนี้คือ วิธีหาค่าเฉลี่ยของค่าสูงสูตนั่นเอง และมีค่า $x_0 = x_2$ เมื่อพิจารณาประกอบรูปที่ 4.8

วิธีแบบศูนย์กลางของพื้นที่ ให้ผลการคีฟัซซึฟิเคชันจากการคำนวณศูนย์กลางแรงโน้มถ่วง (center of gravity) ของการกระจายความเป็นไปได้ของค่าแทนสัญญาณสั่งการควบคุม กล่าวคือ

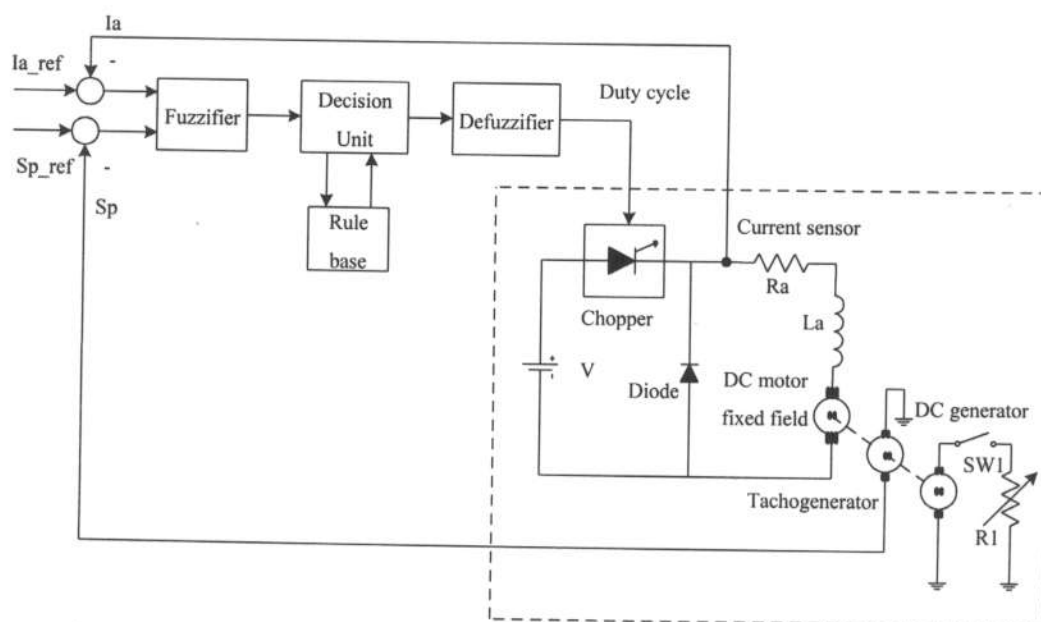
$$x_0 = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(x_j) \cdot x_j}{\sum_{j=1}^n \mu(x_j)}$$

ซึ่ง n เป็นจำนวนของระดับการคว้นไทซ์เอาต์พุต

ในวิธีการคีฟัซซึฟิเคชันเหล่านี้ ได้มีผู้ทำการวิเคราะห์แล้วพบว่าวิธีหาค่าเฉลี่ยของค่าสูงสุดให้ผลดีกว่าต่อสมรรถนะของระบบ เมื่อเปรียบเทียบกับทั้งสามวิธีด้วยกัน วิธีหาค่าเฉลี่ยสูงสุดส่งผลให้ระบบมีสมรรถนะชั่วครู่ที่เหนือกว่า ส่วนวิธีแบบศูนย์กลางของพื้นที่ส่งผลที่ต่ำกว่าต่อสมรรถนะในสภาวะคงตัว

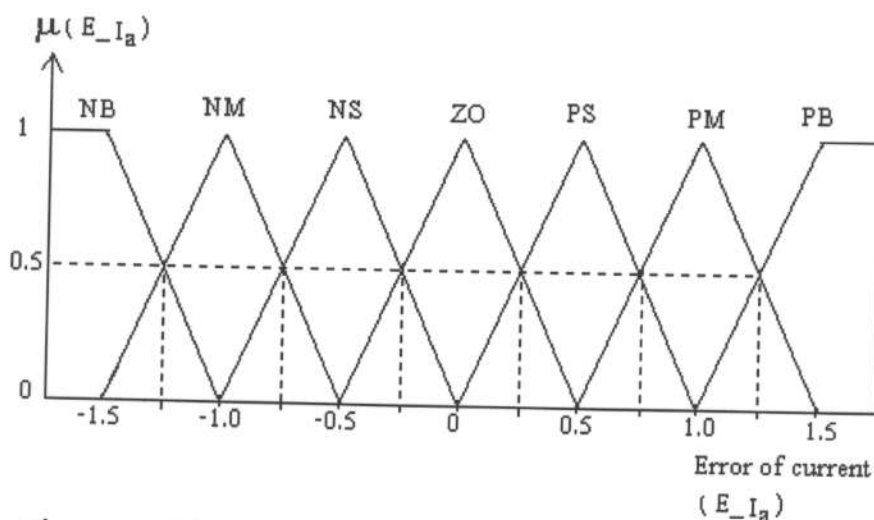
4.5 การออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกในงานวิจัยนี้

จากที่ได้ศึกษาการนำตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกมาใช้ควบคุมระบบการขับเคลื่อนดีซีมอเตอร์ในงานของ Soliman และคณะ (1994) ที่มีทั้งหมด 3 เรื่องด้วยกัน ในงานวิจัยนี้โครงสร้างการควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกจะคล้ายกับงานของ Soliman และคณะ (1994) เรื่อง “A Tunable Fuzzy Logic Controller for Chopper-Fed Separately Excited DC Motor Drives” สิ่งที่จะแตกต่างกันคือขั้นตอนการดีฟัซซี่ฟายเออร์ซึ่งไม่เหมือนกัน โครงสร้างการควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4.9 เริ่มจากการกำหนดค่ากระแสอ้างอิง (I_{a_ref}) ให้กับระบบ (ในที่นี้กำหนดให้เท่ากับค่าสูงสุดของ I_{a_ref} ที่กำหนดให้กับตัวควบคุมความเร็วของการควบคุมแบบฟัซซี่) และกำหนดให้ค่า $Sp_ref = 100$ เรเดียน/วินาที ค่ากระแส I_a ที่ได้จากตัวตรวจวัดกระแสจะนำมาลบกับค่ากระแสอ้างอิง และพร้อมกันนั้นความเร็วรอบของมอเตอร์ที่วัดได้นำมาลบกับค่าความเร็วอ้างอิง ค่าผิดพลาดของกระแส (E_{I_a}) และความเร็วอ้างอิง (Sp_ref) ถูกส่งเข้าไปยังตัวฟัซซี่ฟายเออร์เพื่อแปลงเป็นตัวแปรทางฟัซซี่ และส่งต่อไปยังขั้นตอนการตัดสินใจ ค่าเอาต์พุตที่ได้ในขั้นตอนนี้จะถูกส่งต่อไปยังขั้นตอนการดีฟัซซี่ฟายเออร์เพื่อแปลงตัวแปรทางฟัซซี่ไปเป็นสัญญาณที่จะนำไปใช้ควบคุมระบบ การทำงานของระบบมอเตอร์เริ่มเดินเครื่องในสถานะไร้โหลด (สวิตช์ SW1 อยู่ในสถานะเปิด) ตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกจะใช้ตารางกฎการตัดสินใจชุดหนึ่ง และเมื่อป้อนโหลดให้กับมอเตอร์ตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกจะใช้ตารางกฎการตัดสินใจอีกชุดหนึ่ง



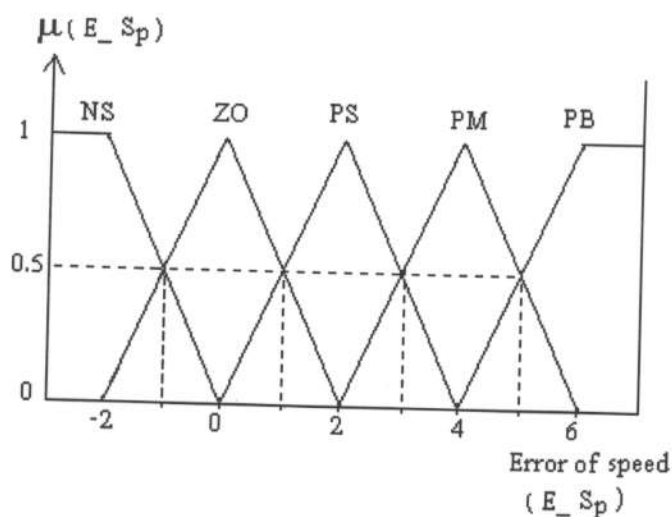
รูปที่ 4.9 แผนภาพการควบคุมระบบขับเคลื่อนโดยตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก

การแปลงค่าผิดพลาดของกระแสไปอยู่ในรูปของตัวแปรทางฟัซซี่สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 4.10 ฟัซซี่เซตที่ใช้อธิบายค่าผิดพลาดของกระแสอาร์เมเจอร์มีทั้งหมด 7 เซตคือ NB (Negative Big) NM (Negative Medium) NS (Negative Small) ZO (about Zero) PS (Positive Small) PM (Positive Medium) PB (Positive Big)



รูปที่ 4.10 ฟัซซี่เซตใช้อธิบายค่าผิดพลาดของกระแสอาร์เมเจอร์

การแปลงค่าผิดพลาดของความเร็วมอเตอร์ไปอยู่ในรูปของตัวแปรทางฟัซซี่สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 4.11 ฟัซซี่เซตที่ใช้อธิบายค่าผิดพลาดของความเร็วประกอบด้วยฟัซซี่เซตทั้งหมด 5 เซตคือ NS (Negative Small) ZO (about Zero) PS (Positive Small) PM (Positive Medium) PB (Positive Big)



รูปที่ 4.11 ฟัซซี่เซตใช้อธิบายค่าผิดพลาดของความเร็ว

ขั้นตอนการตัดสินใจทางฟัซซี่แบ่งตารางกฎการตัดสินใจออกเป็นสองส่วนด้วยกันคือคอนมอเตอร์ทำงานในสภาวะไร้โหลดและมอเตอร์ทำงานในสภาวะมีโหลด ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 ตามลำดับ ค่าที่อยู่ในตารางเป็นฟัซซี่เซตของค่าวัฏจักรหน้าที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.12

ตารางที่ 4.1 ตารางกำหนดกฎการตัดสินใจของฟัซซี่เมื่อมอเตอร์ทำงานในสภาวะไร้โหลด

$E_{I_a} \backslash E_{S_p}$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NS	VS ¹	S ²	S ³	VS ⁴	VS ⁵	VS ⁶	VS ⁷
ZO	S ⁸	S ⁹	SM ¹⁰	SM ¹¹	M ¹²	M ¹³	M ¹⁴
PS	QS ¹⁵	SM ¹⁶	M ¹⁷	MB ¹⁸	QB ¹⁹	B ²⁰	VB ²¹
PM	VS ²²	QS ²³	M ²⁴	QB ²⁵	B ²⁶	VB ²⁷	AL ²⁸
PB	VS ²⁹	S ³⁰	QS ³¹	M ³²	MB ³³	QB ³⁴	VB ³⁵

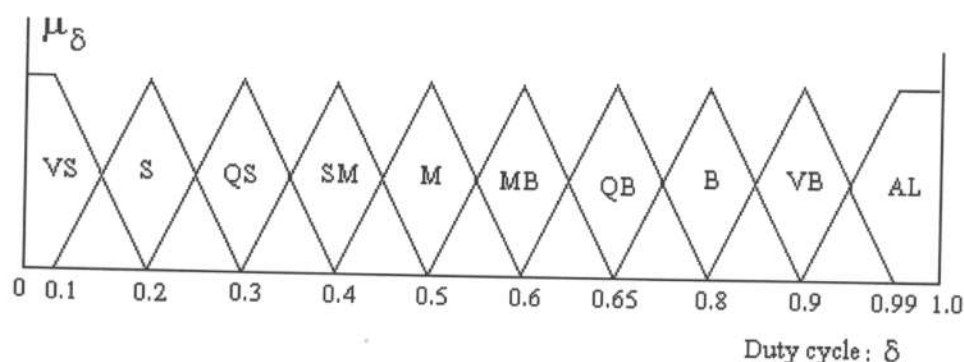
ตารางที่ 4.2 ตารางกำหนดกฎการตัดสินใจของฟัซซี่เมื่อมอเตอร์ทำงานในสภาวะมีโหลด

$E_{I_a} \backslash E_{S_p}$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NS	VS ¹	S ²	S ³	VS ⁴	VS ⁵	VS ⁶	VS ⁷
ZO	S ⁸	S ⁹	SM ¹⁰	SM ¹¹	M ¹²	MB ¹³	QB ¹⁴
PS	QS ¹⁵	SM ¹⁶	M ¹⁷	MB ¹⁸	QB ¹⁹	B ²⁰	VB ²¹
PM	VS ²²	QS ²³	M ²⁴	QB ²⁵	B ²⁶	VB ²⁷	AL ²⁸
PB	VS ²⁹	S ³⁰	QS ³¹	M ³²	MB ³³	QB ³⁴	VB ³⁵

การออกแบบกฎการวินิจฉัยตั้งอยู่บนบรรทัดฐานที่ว่าถ้าค่าผิดพลาดกระแสและค่าผิดพลาดความเร็วมีค่ามาก ค่าวัฏจักรหน้าที่จะถูกกำหนดให้มีค่ามาก และถ้าค่าผิดพลาดกระแสและค่าผิดพลาดความเร็วมีค่าน้อย ค่าวัฏจักรหน้าที่จะถูกกำหนดให้มีค่าน้อยๆ ฟัซซี่เซตที่ใช้อธิบายค่าวัฏจักรหน้าที่แสดงในรูปที่ 15 ประกอบด้วยฟัซซี่เซตทั้งหมด 10 เซตด้วยกันคือ VS (Very Small) S (Small) QS (Quite Small) SM (Small to Medium) M (Medium) MB (Medium to Big) QB (Quite Big)

B (Big) VB (Very Big) AL (About Limit)

การทำงานของตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกที่จะเลือกใช้กฎการควบคุม ตารางที่ 4.1 สำหรับมอเตอร์ทำงานในสภาวะไร้โหลด หรือตารางที่ 4.2 สำหรับมอเตอร์ทำงานในสภาวะมีโหลด ในทางปฏิบัติอาจใช้ลิมิตสวิตช์ติดอยู่ในจุดที่โหลดจะเคลื่อนที่ผ่าน ถ้าโหลดเคลื่อนที่ผ่านจุดที่ติดตั้งลิมิตสวิตช์ ลิมิตสวิตช์ทำงานจะส่งสัญญาณไปให้ตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกใช้กฎการควบคุมในตารางที่ 4.1 แต่ถ้าลิมิตสวิตช์ไม่ทำงานตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกจะใช้กฎการควบคุมดังในตารางที่ 4.2 สำหรับงานวิจัยนี้โปรแกรมจำลองผลการควบคุมมอเตอร์โดยตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก ที่นำเสนอไว้ในภาคผนวก ง. สมมุติให้ที่เวลา $t = 0-3$ วินาที มอเตอร์ทำงานในสภาวะไร้โหลด กำหนดให้โหลด $T_L = 0$ นิวตัน-เมตร และเมื่อ $t > 3$ วินาที กำหนดหนดให้มีโหลด $T_L = 9$ นิวตัน-เมตร



รูปที่ 4.12 ฟัซซี่เซตใช้อธิบายค่าวัฏจักรหน้าที่ที่จะกำหนดให้วงจรสับไฟฟ้าทำงาน

ในทางปฏิบัติค่า I_{a_ref} , I_a , Sp_ref , Sp จะมีค่าจริงอยู่ในรูปแรงดันไฟฟ้า การหาค่าผิดพลาดของกระแสและค่าผิดความเร็วสร้างโดยวงจรขยายผลต่าง (difference amplifier) การตรวจวัดกระแสอาร์เมเจอร์จะอาศัยการต่อความต้านจากภายนอกอนุกรมกับความต้านทานของวงจรอาร์เมเจอร์แล้ววัดแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานที่นำมาต่อ แรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแส ในงานวิจัยนี้ค่าความต้านทานภายนอกใช้ค่าเท่ากับ 0.4Ω (Sen, 1985) ค่าอัตราขยายของตัวตรวจวัดกระแส $k_t = 0.5$ โวลต์/แอมแปร์ และค่าอัตราขยายของเครื่องวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ $k_r = 0.057$ โวลต์วินาที/rad. กำหนดให้ค่า $I_{a_ref} = 13$ โวลต์ (หมายถึงกระแสอ้างอิง $I_{a_ref} = 26$ แอมแปร์) และกำหนดให้ค่า $Sp_ref = 5.7$ โวลต์ (หมายถึงค่าความเร็วอ้างอิง $Sp_ref = 100$ เรเดียน/วินาที) สมมุติว่าตัวตรวจวัดกระแสวัดค่า $I_a = 12$ โวลต์ ดังนั้นจะได้ค่า

$$E_{Ia} = I_{a_ref} - I_a = 13 - 11.8 = 1.2 \text{ โวลต์}$$

เมื่อเทียบค่านี้นับรูปที่ 4.10 จะตรงกับฟuzzyเซต PM และ PB ซึ่งจะมีค่า

$$\mu_{PM}(E_{Ia}) = 0.6 \text{ และ } \mu_{PB}(E_{Ia}) = 0.4$$

ถ้าสมมุติว่าเครื่องวัดความเร็วรอบวัด $Sp = 3.2$ โวลต์ ดังนั้นจะได้ค่า

$$E_{Sp} = Sp_{ref} - Sp = 5.7 - 3.2 = 2.5 \text{ โวลต์}$$

เมื่อเทียบค่านี้นับรูปที่ 4.11 จะตรงกับฟuzzyเซต PS และ PM ซึ่งจะมีค่า

$$\mu_{PS}(E_{Sp}) = 0.75 \text{ และ } \mu_{PM}(E_{Sp}) = 0.25$$

สมมุติมอเตอร์ทำงานในสภาวะไร้โหลดจากฟuzzyเซตที่ได้

$$E_{Ia} = \{PM, PB\} \text{ และ } E_{Sp} = \{PS, PM\}$$

ทำการเปิดตารางกฎการควบคุมดังแสดงในตารางที่ 4.1 จะตรงกับกฎการควบคุมทั้งหมด 4 กฎ คือ กฎข้อที่ 20, 21, 27, 28 จากตารางสามารถให้ความหมายดังมีรายละเอียดดังนี้

กฎข้อที่ 20

$$\text{IF } E_{Ia}=PM \text{ AND } E_{Sp}=PS \text{ THEN Duty cycle}=B$$

กฎข้อที่ 21

$$\text{IF } E_{Ia}=PB \text{ AND } E_{Sp}=PS \text{ THEN Duty cycle}=VB$$

กฎข้อที่ 27

$$\text{IF } E_{Ia}=PM \text{ AND } E_{Sp}=PM \text{ THEN Duty cycle}=VB$$

กฎข้อที่ 28

$$\text{IF } E_{Ia}=PB \text{ AND } E_{Sp}=PM \text{ THEN Duty cycle}=AL$$

กลไกการวินิจฉัยในแต่ละกฎจะใช้ค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปร E_{Ia} และ E_{Sp} ในแต่ละฟuzzyเซตในการตัดสินใจเลือกค่าวัฏจักรหน้าที่ ในกฎข้อที่ 20 ผลลัพธ์ของ $E_{Ia}=PM \text{ AND } E_{Sp}=PS$ แทนด้วยตัวแปร w_{20} วิธีการตัดสินใจใช้ตัวกระทำทางฟuzzyที่เรียกว่าการยูเนียนของฟuzzyเซตสองเซต ซึ่งก็คือการเลือกค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปรฟuzzyที่มีค่าน้อยที่สุด

$$w_{20} = \min\{\mu_{PM}(E_{Ia}), \mu_{PS}(E_{Sp})\} = \min\{0.6, 0.75\} = 0.6$$

ดังนั้นกฎข้อที่ 20 ค่าวัฏจักรหน้าที่ δ ที่กำหนดให้เท่ากับฟuzzyเซต B จะมีค่าความเป็นสมาชิก

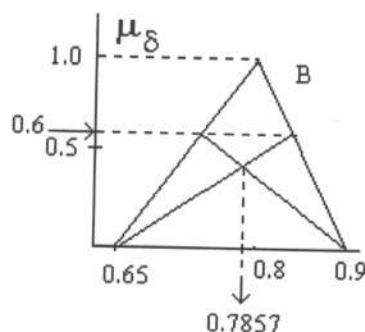
$$\mu_B(\delta) = w_{20} = 0.6$$

เมื่อใช้วิธีการหาค่าวัฏจักรหน้าที่ โดยการหาค่าจากจุดศูนย์กลางพื้นที่ดังแสดงในรูปที่ 4.13 จะได้ค่าวัฏจักรหน้าที่ $= 0.7857$ โดยกำหนดให้เป็นตัวแปร $c_{20} = 0.7857$

ในทำนองเดียวกันกฎข้อที่ 21, 27, 28 จะได้ค่า

$$w_{21} = \min\{\mu_{PB}(E_{Ia}), \mu_{PS}(E_{Sp})\} = \min\{0.4, 0.75\} = 0.4$$

$$w_{27} = \min\{\mu_{PM}(E_{Ia}), \mu_{PM}(E_{Sp})\} = \min\{0.6, 0.25\} = 0.25$$



รูปที่ 4.13 การหาค่าวัฏจักรหน้าที่ โดยวิธีการหาค่าจากจุดศูนย์กลางพื้นที่

$$w_{28} = \min\{\mu_{PB}(E_{Ia}), \mu_{PM}(E_{Sp})\} = \min\{0.4, 0.25\} \\ = 0.25$$

$$c_{21} = 0.89625$$

$$c_{27} = 0.89572$$

$$c_{28} = 0.95632$$

ขั้นตอนการดีฟัซซิฟายเออร์ในงานวิจัยนี้วิธีการหาค่าวัฏจักรหน้าที่ ใช้วิธีการหาจากจุดศูนย์กลางมวล (centre of gravity) จากสูตร

$$\text{Duty cycle} = \frac{\sum_{i=1}^N w_i c_i}{\sum_{i=1}^N w_i}$$

เมื่อ N คือจำนวนกฎที่ถูกวินิจฉัย, w_i เรียกว่าค่าแฟคเตอร์น้ำหนัก (weighting factor), c_i เรียกว่าค่าเอาต์พุตที่ได้จากการวินิจฉัยในแต่ละกฎ ดังนั้น

$$\text{Duty cycle} = \frac{w_{20}c_{20} + w_{21}c_{21} + w_{27}c_{27} + w_{28}c_{28}}{w_{20} + w_{21} + w_{27} + w_{28}} \\ = \frac{(0.6 \times 0.7857) + (0.4 \times 0.89625) + (0.25 \times 0.89572) + (0.25 \times 0.95632)}{0.6 + 0.4 + 0.25 + 0.25} = 0.862$$

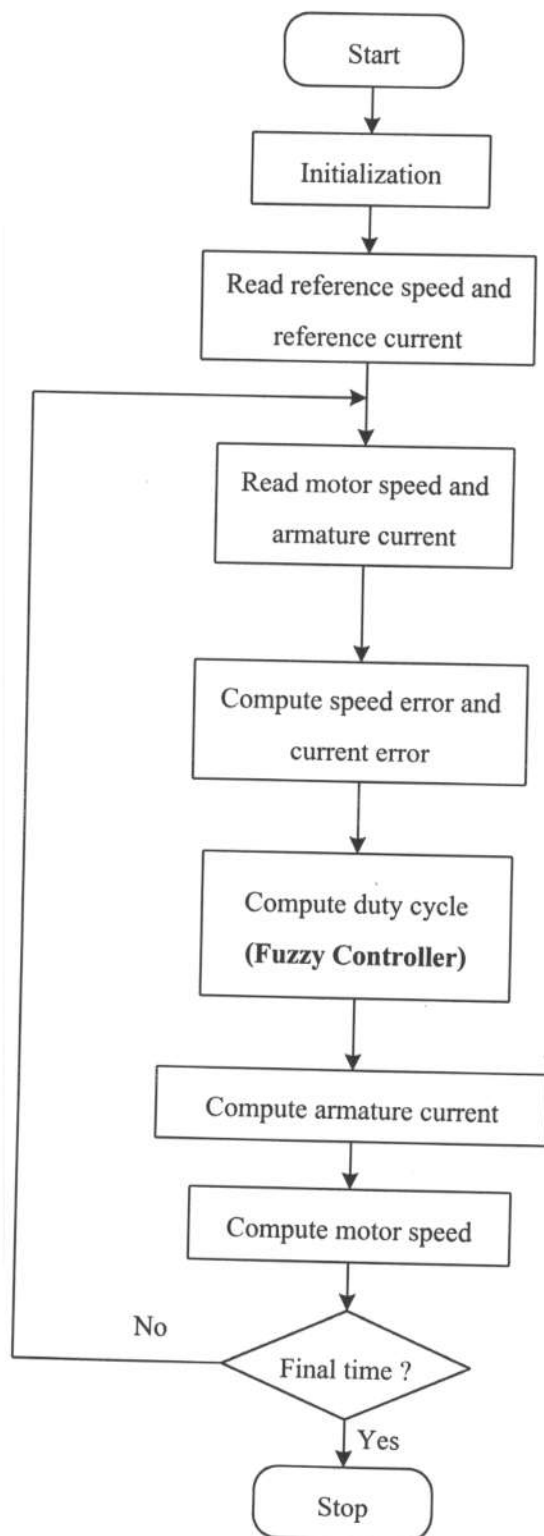
ถ้าวงจรสับไฟฟ้ากำหนดให้ความถี่ในการการสับไฟฟ้า $f_c = 200$ เฮิร์ตซ์ หรือคาบเวลา $T_c = 0.005$ วินาที ดังนั้นเวลาที่จะกำหนดให้ไทรสเตอร์หรือ SCR นำกระแสหาได้จาก

$$T_{ON} = \text{Duty cycle} \times T_c = 0.862 \times 0.005 = 4.31 \text{ มิลลิวินาที}$$

$$T_{OFF} = T_c - T_{ON} = 0.69 \text{ มิลลิวินาที}$$

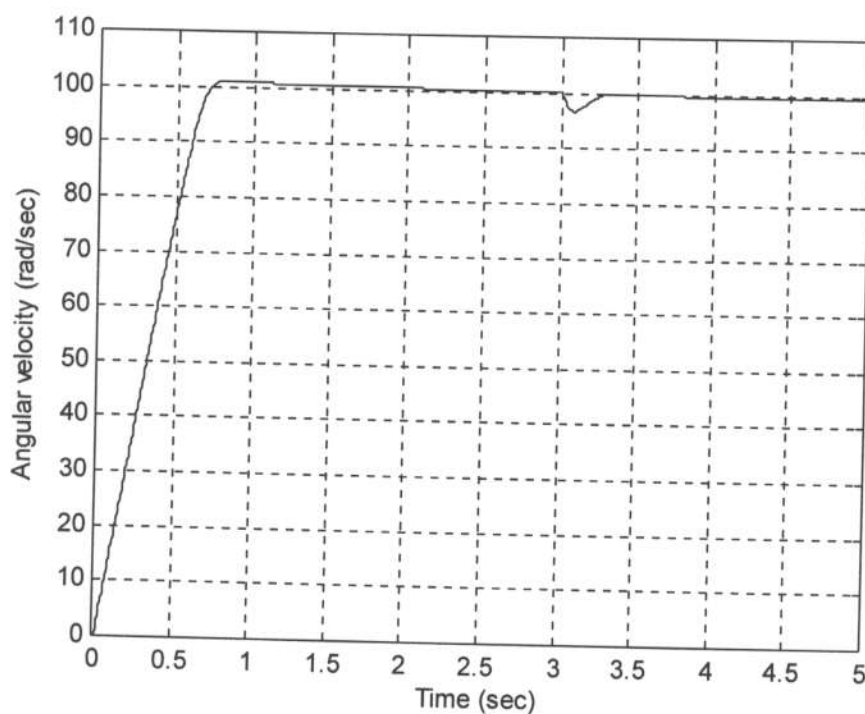
4.6 ผลการจำลองการทำงานของตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก

จากการออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ 4.5 นำมาเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยภาษาปาสคาลซึ่งมีลำดับขั้นตอนการทำงานดังแสดงในรูปที่ 4.14 เริ่มต้นจากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบขับเคลื่อน จากนั้นกำหนดค่าความเร็วอ้างอิงและกระแสอาร์เมเจอร์อ้างอิงให้กับระบบ เมื่อวงจรสับไฟฟ้าทำงานครบ 1 คาบเวลาการสับสัญญาณ จะทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของความเร็วและค่าเฉลี่ยของกระแสอาร์เมเจอร์ ค่าที่ได้จะนำไปลบกับค่าความเร็วอ้างอิงและค่ากระแสอาร์เมเจอร์อ้างอิง ค่าผิดพลาดของความเร็วและค่าผิดพลาดของกระแสอาร์เมเจอร์จะถูกส่งเข้าไปยังตัวควบคุมแบบฟัซซี่ ในขั้นตอนนี้ขบวนการทางฟัซซี่จะคำนวณหาค่าวัฏจักรหน้าที่ ที่จะกำหนดให้วงจรสับไฟฟ้าทำงาน หลังจากนั้นโปรแกรมจะทำการแก้สมการเชิงอนุพันธ์เพื่อหาค่ากระแสอาร์เมเจอร์และความเร็วของมอเตอร์ และถ้าเวลาที่กำหนดให้ยังไม่สิ้นสุดโปรแกรมก็จะทำงานซ้ำไปเรื่อยๆ



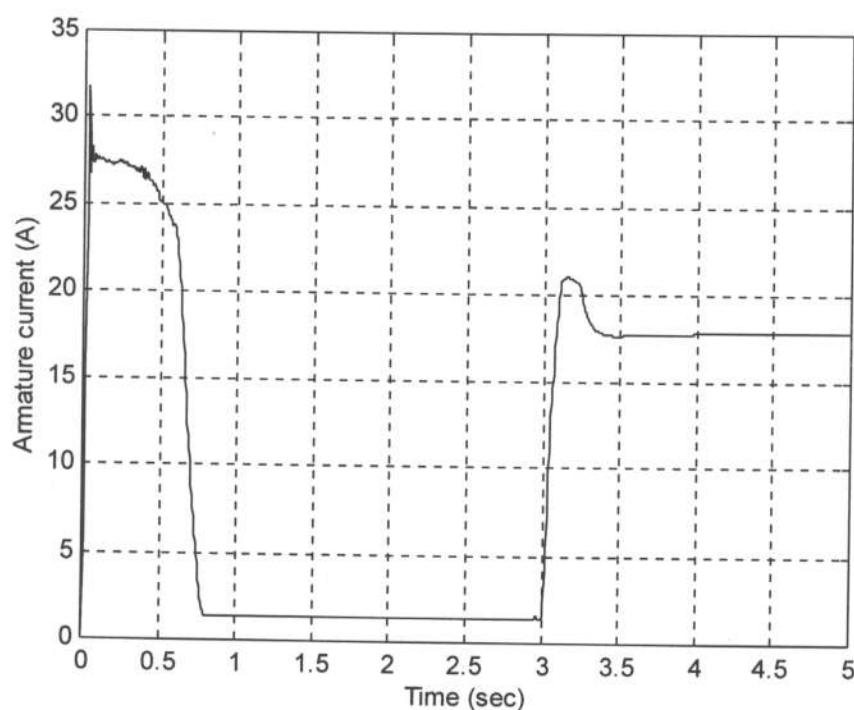
รูปที่ 4.14 แผนภาพการทำงานของโปรแกรมการควบคุมมอเตอร์
ด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก

รูปที่ 4.15 แสดงผลการตอบสนองด้านความเร็วของมอเตอร์ต่อคำสั่งความเร็วอ้างอิงแบบขั้น และการป้อนโหลดที่เวลา 3 วินาที ของระบบการควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก จากรูปเริ่มจากที่เวลา $t = 0$ วินาที มอเตอร์ที่อยู่ในสถานะไร้โหลดได้รับคำสั่งให้หมุนด้วยความเร็ว 100 เรเดียน/วินาที ความเร็วของมอเตอร์เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งถึงความเร็ว 100 เรเดียน/วินาที เป็นครั้งแรกที่เวลาประมาณ 0.721 วินาที และความเร็วพุ่งเกินไปสูงสุดที่ค่า 100.91 เรเดียน/วินาที คิดเป็นค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินประมาณ 1 % หลังจากนั้นความเร็วค่อยๆ ลดลง และเมื่อถึงเวลา 3 วินาที ป้อนโหลดให้กับมอเตอร์ $T_L = 9$ นิวตัน-เมตร การตอบสนองด้านความเร็วมีค่าลดลงมาต่ำสุดอยู่ที่ค่า 96.75 เรเดียน/วินาที และกลับเข้าสู่ค่าสภาวะคงตัวอย่างรวดเร็วอยู่ที่ค่า 99.61 เรเดียน/วินาที คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเท่ากับ 0.39 %



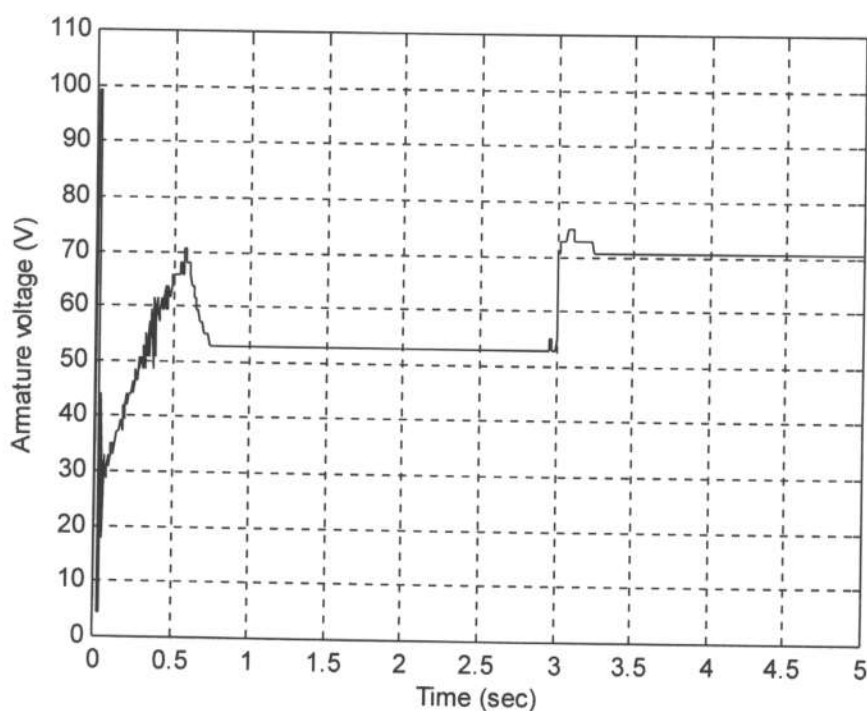
รูปที่ 4.15 ผลการตอบสนองด้านความเร็วของมอเตอร์ต่อคำสั่งอ้างอิงแบบขั้น และการป้อนโหลดที่เวลา 3 วินาที (FLC)

รูปที่ 4.16 แสดงการเปลี่ยนแปลงของกระแสอาร์เมเจอร์เฉลี่ยต่อคำสั่งความเร็วอ้างอิงแบบขั้น และการป้อนโหลดที่เวลา 3 วินาที ในช่วงเวลา 0 - 3.0 วินาที มอเตอร์ทำงานในสภาวะไร้โหลด เมื่อสังเกตกราฟของกระแสอาร์เมเจอร์ในช่วงเวลา 0 - 0.1 วินาที กระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งสูงสุดที่ค่าประมาณ 32 แอมแปร์ สาเหตุที่กระแสอาร์เมเจอร์สูงขึ้นอย่างรวดเร็วเกิดจากตัวควบคุมแบบฟuzzyลอจิกสั่งการให้วงจรสับไฟฟ้าทำงานในช่วงนำกระแสเป็นเวลานาน ทั้งนี้เกิดจากในช่วงเริ่มเดินเครื่องค่าผิดพลาดกระแสอาร์เมเจอร์และค่าผิดพลาดความเร็วมอเตอร์มีค่าสูงมาก ดังนั้นการทำงานของตัวควบคุมแบบฟuzzyจึงจะให้ค่าวัฏจักรหน้าที่มีค่าสูงมากเช่นกัน และหลังจากนั้นที่เวลาประมาณ 0.5 วินาที กระแสเริ่มลดลงอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เกิดจากการตอบสนองด้านความเร็วของมอเตอร์ใกล้จะถึงค่าความเร็วอ้างอิงแล้ว ตัวควบคุมแบบฟuzzyจะกำหนดให้ค่าวัฏจักรหน้าที่มีค่าน้อยๆ และกระแสลดลงมาต่ำสุดที่ค่าประมาณ 1.8 แอมแปร์ และคงที่อยู่ที่ค่านี้นจนกระทั่งถึงเวลา 3 วินาที มอเตอร์ได้รับโหลด $T_L = 9$ นิวตัน-เมตร กระแสอาร์เมเจอร์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเพื่อที่จะสร้างแรงบิดให้มากขึ้นซึ่งจะทำให้ความเร็วของมอเตอร์กลับเข้าสู่ค่าความเร็วอ้างอิงได้อย่างเร็วที่สุด และหลังจากนั้นกระแสอาร์เมเจอร์จะลดลงมาคงที่ค่าประมาณ 18 แอมแปร์



รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงของกระแสอาร์เมเจอร์เฉลี่ยต่อคำสั่งความเร็วอ้างอิงแบบขั้น และการป้อนโหลดที่เวลา 3 วินาที (FLC)

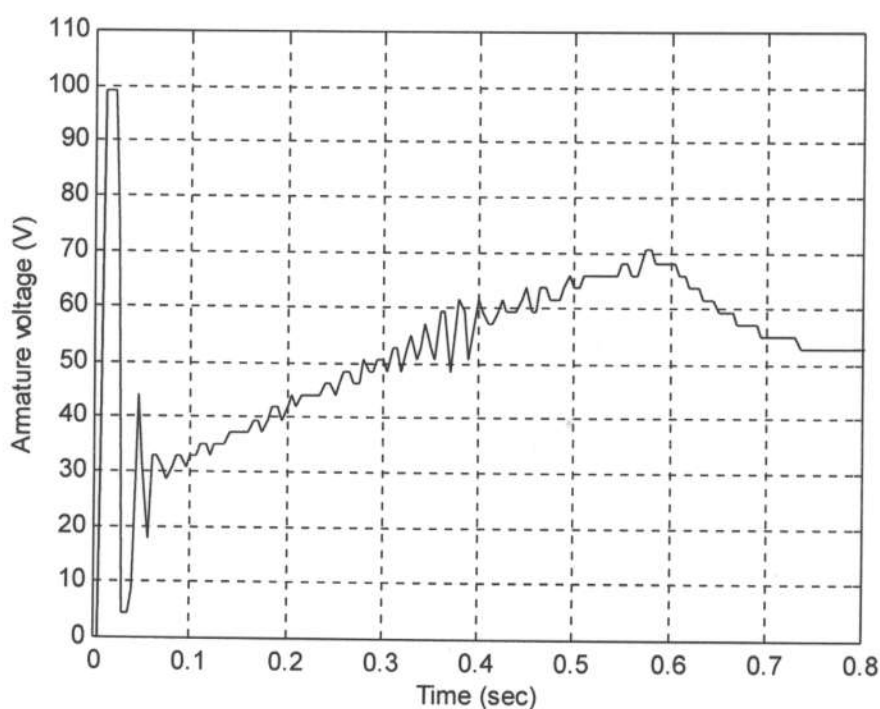
รูปที่ 4.17 แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเฉลี่ยที่ป้อนให้กับมอเตอร์ต่อคำสั่งความเร็วอ้างอิงแบบขั้น และการป้อนโหลดที่เวลา 3 วินาที ในช่วงเวลา 0 - 3 วินาที มอเตอร์ทำงานในสภาวะไร้โหลด แรงดันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งถึงค่าสูงสุดประมาณ 99 โวลต์ ที่เวลาประมาณ 0.05 วินาที และลดลงอย่างรวดเร็วมาหยุดที่ค่าต่ำสุดประมาณ 5 โวลต์ ที่เวลาประมาณ 0.09 วินาที (ถ้าสังเกตเส้นกราฟในช่วงเวลา 0 - 0.5 วินาที ที่มีลักษณะเป็นเส้นที่บิดคั่นนั้นเกิดจากการวาดกราฟที่เส้นกราฟอยู่ชิดกันมากเกินไป รูปกราฟที่ชัดเจนขึ้นในช่วงนี้แสดงดังรูปที่ 4.18) และหลังจากนั้นแรงดันเฉลี่ยที่ป้อนให้กับมอเตอร์จะค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งสูงสุดที่ค่าประมาณ 70 โวลต์ ที่เวลาประมาณ 0.6 วินาที ในช่วงเวลานี้ความเร็วของมอเตอร์ถึงค่าอ้างอิงที่กำหนดไว้แล้ว ดังนั้นแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์จะลดลงและคงที่อยู่ที่ค่าประมาณ 53 โวลต์ และเมื่อถึงเวลา 3 วินาที มอเตอร์ได้รับโหลด $T_L = 9$ นิวตัน-เมตร แรงดันเฉลี่ยที่ป้อนให้กับมอเตอร์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและคงที่อยู่ที่ค่าประมาณ 71 โวลต์



รูปที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันเฉลี่ยที่ป้อนให้กับมอเตอร์

ต่อคำสั่งความเร็วอ้างอิงแบบขั้น และการป้อนโหลดที่เวลา 3 วินาที (FLC)

รูปที่ 4.18 แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเฉลี่ยที่ป้อนให้กับมอเตอร์ต่อคำสั่งความเร็วอ้างอิงแบบขั้น (เป็นส่วนขยายของกราฟในรูปที่ 4.17 ในช่วงเวลา 0-0.8 วินาที ให้เห็นชัดเจนขึ้น) เมื่อมอเตอร์เริ่มเดินเครื่องในสภาวะไร้โหลด แรงดันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งถึงค่าสูงสุดประมาณ 99 โวลต์ และหลังจากนั้นแรงดันลดลงอย่างรวดเร็วมาหยุดที่ค่าต่ำสุดประมาณ 5 โวลต์ ต่อจากนั้นแรงดันค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งสูงสุดที่ค่าประมาณ 70 โวลต์ ที่เวลาประมาณ 0.6 วินาที ในช่วงเวลานี้ความเร็วของมอเตอร์ถึงค่าอ้างอิงที่กำหนดไว้แล้วดังนั้นแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์จะลดลงและคงที่อยู่ที่ค่าประมาณ 53 โวลต์



รูปที่ 4.18 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันเฉลี่ยที่ป้อนให้กับมอเตอร์
ต่อคำสั่งความเร็วอ้างอิงแบบขั้น ในช่วงเวลา 0 - 0.8 วินาที (FLC)

4.7 สรุป

บทนี้ได้บรรยายถึงทฤษฎีของฟิชชีเซตและฟิชชีลอจิก การปฏิบัติการทางคณิตศาสตร์ภายใต้ฟิชชีเซต วิธีการออกแบบและการอนุวัตรระบบควบคุมแบบฟิชชี วิธีการกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกภาพ การสังเคราะห์กฎการควบคุม รูปแบบการอนุมานหรือรูปแบบการวินิจฉัยทางฟิชชี เทคนิคของการดีฟิชชีฟิเคชันในรูปแบบต่างๆ และได้ออกแบบตัวควบคุมแบบฟิชชีลอจิกเพื่อใช้เป็นตัวควบคุมวงจรสับไฟฟ้าในการขับเคลื่อนมอเตอร์ และได้เขียนโปรแกรมการจำลองผลการทำงานของระบบการควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบฟิชชีลอจิกที่ได้ออกแบบไว้ เพื่อคุณสมบัติของระบบขับเคลื่อน ซึ่งผลการจำลองการทำงานที่ได้จะได้นำไปเปรียบเทียบกับการควบคุมแบบเดิมที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ