

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

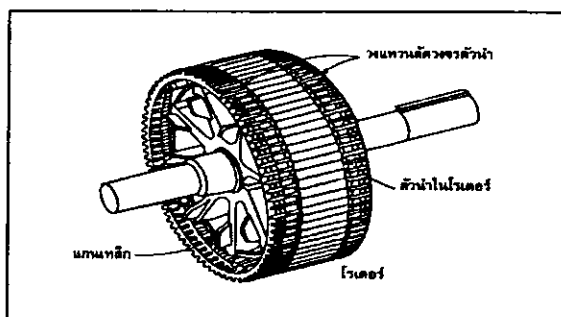
งานวิจัยชิ้นนี้ได้มุ่งเน้นเพื่อการควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับเครื่องพิมพ์และตัดเหล็ก โดยการนำทฤษฎีการควบคุมพีชชีลลิจมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมดังกล่าว จะต้องควบคุมให้มอเตอร์สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ตำแหน่งเป้าหมายได้อย่างแม่นยำ และใช้เวลาในการเข้าสู่เป้าหมายอย่างรวดเร็ว โดยใช้ตัวควบคุมพีชชีลลิจ และในการออกแบบตัวควบคุมนั้น จำเป็นต้องนำความรู้ที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีพีชชีลลิจไปกำหนดโครงสร้างและวิธีการออกแบบให้เหมาะสม ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึง เนื้อหาที่เกี่ยวกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้ในงานวิจัยนี้ และทฤษฎีพีชชีลลิจที่จะนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมต่อไป

2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

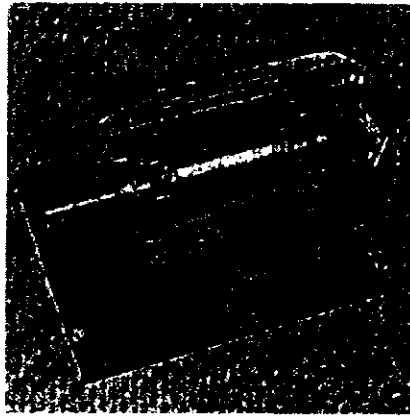
มอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิดมอเตอร์เหนี่ยวนำ (induction motor) นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีราคาไม่แพง, มีความเร็วค่อนข้างคงที่ และสะดวกในการบำรุงรักษา อย่างไรก็ตามมอเตอร์เหนี่ยวนำมีข้อเสีย คือมีค่าตัวประกอบกำลังต่ำและมีค่าต่ำ ดังนั้นโรงงานอุตสาหกรรมที่มีมอเตอร์เหนี่ยวนำจำนวนมาก จะต้องมีการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง เพื่อไม่ให้ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมีค่ามากเกินไปและเป็นการสิ้นเปลืองค่าไฟฟ้าอีกด้วย

2.1.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เนื่องจากมอเตอร์ที่ใช้เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน กล่าวคือประกอบด้วยส่วนสเตเตอร์ (stator) ส่วนโรเตอร์ (rotor) และฝาปิดหัวท้ายของมอเตอร์ที่ทำหน้าที่ยึดเพลาดังภาพประกอบ 2-1

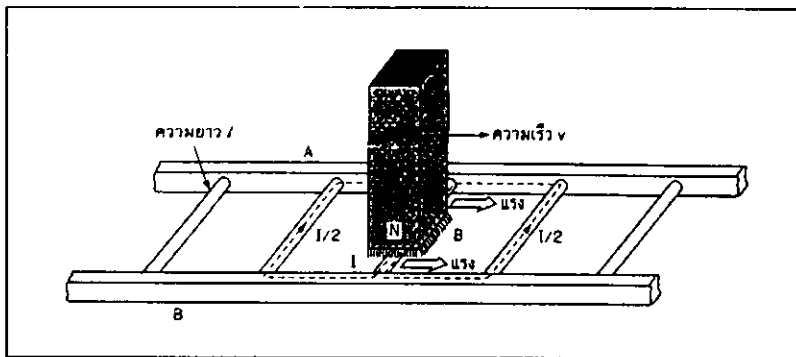


(ก) โรเตอร์แบบกรงกระรอก (ผลิตภัณฑ์: General Electric)



(ข) ภาพตัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส (ผลิตภัณฑ์: SIEMENS)
 ภาพประกอบ 2-1 โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก
 (นภัทร วัฒนเทพินทร์และประเสริฐ ปิ่นปฐมรัฐ,2544)

หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ ที่เกี่ยวกับแรงที่เกิดขึ้นจากการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในตัวนำ ดังนั้นเพื่อความเข้าใจในหลักการดังกล่าวให้พิจารณาจากภาพประกอบ 2-2

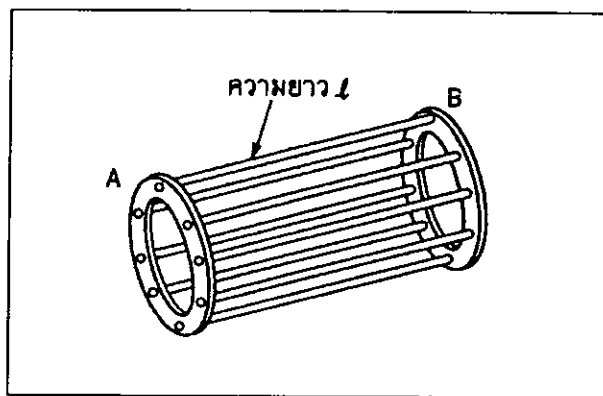


ภาพประกอบ 2-2 การเกิดแรงที่ตัวนำรูปบันได เมื่อสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่
 (นภัทร วัฒนเทพินทร์และประเสริฐ ปิ่นปฐมรัฐ,2544)

เมื่อแท่งแม่เหล็กถาวรเคลื่อนที่อยู่บนตัวนำรูปคล้ายบันได โดยความเร็วในการเคลื่อนที่ของขั้วแม่เหล็ก คือ v สนามแม่เหล็กที่เกิดจากขั้วแม่เหล็กนี้ คือ B และความยาวของตัวนำ คือ l พิจารณาปรากฏการณ์เหนี่ยวนำตามลำดับ ได้ดังนี้

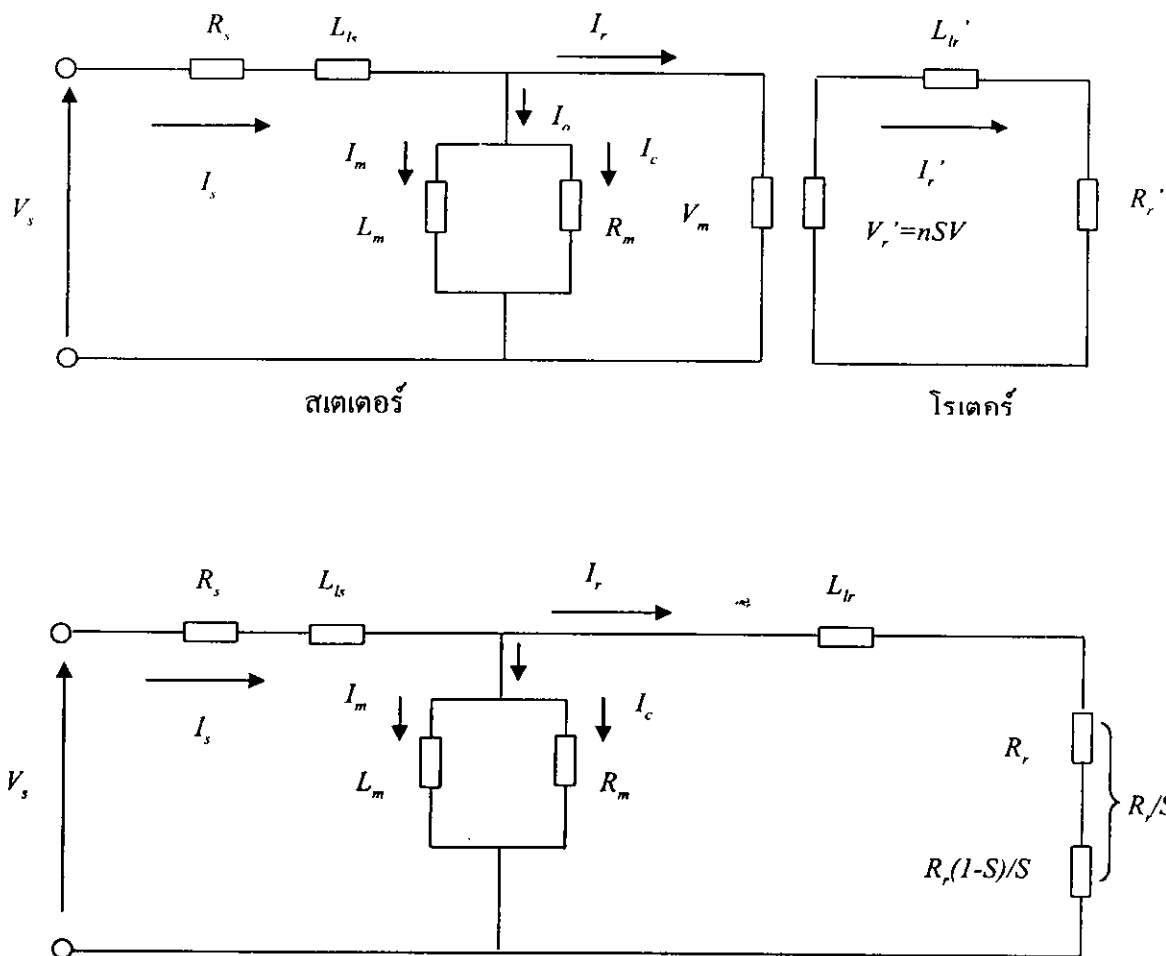
1. เมื่อขั้วแม่เหล็กเคลื่อนที่ไปตามทิศทางที่ลูกศรชี้ และมีความเร็วเท่ากับ v เส้นแรงแม่เหล็ก B จะตัดตัวนำ l ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในตัวนำนี้ เท่ากับ $E = B/v$
2. แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ E จะทำให้เกิดกระแส I ไหลในตัวนำตามทิศทางที่แสดงในภาพประกอบ 2-2
3. เนื่องจากมีกระแสไหลในขดลวดตัวนำ ขณะที่ตัวนำนั้นอยู่ภายใต้เส้นแรงแม่เหล็ก จึงเกิดแรงขึ้น และแรงที่เกิดขึ้นนี้จะมีทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของขั้วแม่เหล็ก

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการเหนี่ยวนำขึ้นที่ตัวนำรูปบันไดและเป็นผลให้ตัวนำนั้นเคลื่อนที่ไปตามทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เคลื่อนที่อยู่ นั่น หลักการนี้ คือ หลักการที่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่มีโรเตอร์แบบกรงกระรอกหมุนไปได้ภายใต้สนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดกับสเตเตอร์ เมื่อนำตัวนำรูปบันไดจากรูปข้างต้น มาหมุนเป็นทรงกระบอกดังภาพประกอบ 2-3 นั่นคือลักษณะของโรเตอร์แบบกรงกระรอกนั่นเอง โดยแกน A และ B ของตัวนำ เมื่อหมุนเป็นวงกลม จะทำหน้าที่เป็นแหวนตัวนำปิดด้านหัวและด้านท้ายของโรเตอร์ดังนั้นเมื่อสนามแม่เหล็กหมุนไปรอบๆ สเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะทำให้โรเตอร์เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและเกิดทอร์กหมุนตามทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุน โดยจะมีความเร็วช้ากว่าสนามแม่เหล็กหมุนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



ภาพประกอบ 2-3 ลักษณะของตัวนำของโรเตอร์แบบกรงกระรอก
(นภัทร วจันทพิรินทร์และประเสริฐ ปิ่นปฐมรัฐ, 2544)

โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงแต่ต่างกันตรงที่ด้านทุติยภูมิของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถหมุนได้ ดังนั้นสามารถเขียนวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ในลักษณะเดียวกันกับหม้อแปลงไฟฟ้าทุกประการ ดังแสดงในภาพประกอบ 2-4



ภาพประกอบ 2-4 วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำ (ศิระ หงษ์นภา, 2543)

จากภาพประกอบ 2-4

$$I_r = nI_r' = \frac{n^2 S V_m}{R_r' + j\omega_s L_{lr}} \quad (2.1)$$

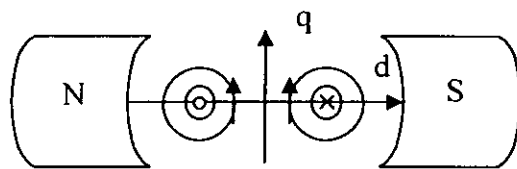
$$I_r = \frac{V_m}{\left(\frac{R_r}{S}\right) + j\omega_e L_{lr}} \quad (2.2)$$

โดยที่ค่าพารามิเตอร์ R_r และ L_r เป็นค่าที่โอนไปไว้ทางสเตเตอร์แล้ว จากรูปและสมการข้างต้น จะเห็นว่าถ้าค่าสลิป S ยิ่งมาก I_r ก็จะมาก ณ จุดที่มอเตอร์หยุดนิ่ง ค่าสลิป $S=1$ เปรียบเสมือนการลัดวงจรทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง ในขณะที่ความเร็วเชิงโรตอร์ ค่าสลิป $S=0$ เปรียบเสมือนการเปิดวงจรทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง การรับภาระของมอเตอร์ก็就会被ส่งผ่านเข้าสู่ระบบในรูปของการเปลี่ยนค่าสลิป S ถ้าภาระน้อย ค่าสลิป S ก็เข้าใกล้ 0 แต่ถ้าภาระมาก ค่าสลิป S ก็วิ่งเข้าหา 1

2.1.2 แบบจำลองพลศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (AC motor's Dynamic Model)

จากการพิจารณาค่าตัวแปรเป็นค่าต่อเฟสในวงจรมวลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ พบว่าจะมีความถูกต้องเมื่อมอเตอร์อยู่ในสภาวะคงตัว (steady state) เท่านั้น กล่าวคือมอเตอร์รับโหลดคงที่หรือหมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ แต่ในการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ หรือที่เรียกว่า สภาวะเปลี่ยนแปลง (transient state) เช่น เกิดความเร็ว, เบรก หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงของโหลดทางกล จำเป็นต้องเข้าใจในแบบจำลองดังกล่าว

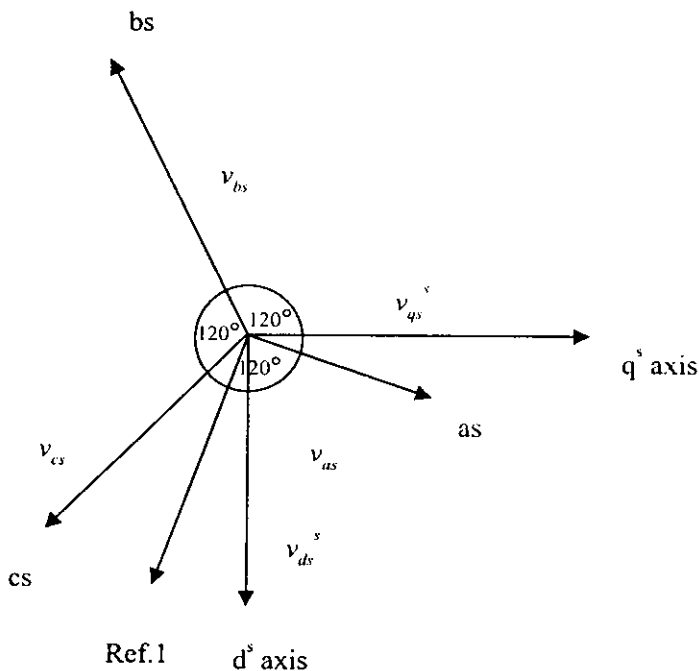
ถ้าสังเกตกราฟความสัมพันธ์แรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสสลับที่ควบคุมให้ v/f คงที่กับกราฟความสัมพันธ์แรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสตรงแล้ว จะพบว่ากราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวของมอเตอร์ทั้งสองชนิดมีลักษณะเหมือนกัน แต่การควบคุมมอเตอร์กระแสตรงจะง่ายกว่ามากๆ ในขณะที่การควบคุมมอเตอร์กระแสสลับค่อนข้างสลับซับซ้อน ดังนั้นเพื่อให้การควบคุมมอเตอร์กระแสสลับเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นจึงเกิดแนวความคิดที่จะมองมอเตอร์กระแสสลับให้เป็นมอเตอร์กระแสตรงเพื่อง่ายต่อการควบคุม และวิธีดังกล่าวสามารถทำได้โดยการโอนย้ายตัวแปรต่าง ๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับให้มาอยู่บนแกน d-q ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งแสดงไว้ดังภาพประกอบ 2-5



ภาพประกอบ 2-5 แกน d เกิดจากสนามแม่เหล็กหลัก และแกน q เกิดจากสนามแม่เหล็กบนโรเตอร์

โดยที่แกน d-q นี้ ยังสามารถที่จะพิจารณาให้เป็นแกนที่อยู่กับที่หรือเป็นแกนที่หมุนได้ด้วยความเร็วเชิงมุม ω_r ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการที่จะพิจารณาสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับให้อยู่ในรูปสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่หยุดนิ่งอยู่กับที่

2.1.2.1 การย้ายแกน



ภาพประกอบ 2-6 การย้ายแกนของระบบไฟฟ้า 3 เฟสให้ห้อยบนแกน d-q
ในระบบแกนอ้างอิงคงที่ (ศิวัะ หงษ์นภา, 2543)

จากภาพประกอบ 2-6 เป็นเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันที่จ่ายให้สเตเตอร์ as, bs และ cs กับแกน d^s และ q^s ซึ่งจะทำการย้ายแกนของแรงดัน 3 เฟสเข้าหา สำหรับสัญลักษณ์ของเฟส a,b,c และแกน d,q นั้น จะใช้สัญลักษณ์ s ตัวล่างเพื่อบอกว่าเฟสเซอร์และแกนที่อ้างอิงอยู่บนสเตเตอร์ ส่วน s ตัวบนแทนแกนอ้างอิงที่อยู่นิ่ง (stationary axis) มุม θ เป็นมุมระหว่างเฟส a และแกน q ซึ่งจะมีค่าเป็นเท่าใดก็ได้ เริ่มการพิจารณา ดังต่อไปนี้

1. พิจารณาองค์ประกอบของแรงดัน v_{ds}^s และ v_{qs}^s บนแกน as
 - 1.1 องค์ประกอบของ v_{qs}^s บนแกน as คือ $v_{qs}^s \cos \theta$
 - 1.2 องค์ประกอบของ v_{ds}^s บนแกน as คือ $v_{ds}^s \sin \theta$ ทั้งนี้อ้างอิงมุม θ กับแกน Ref.1 ซึ่งตั้งฉากกับ as ทำให้แกน Ref.1 ทำมุม θ กับแกน d^s ด้วย
2. พิจารณาองค์ประกอบของแรงดัน v_{ds}^s และ v_{qs}^s บนแกน bs
 - 2.1 องค์ประกอบของ v_{qs}^s บนแกน bs คือ $v_{qs}^s \cos (120-\theta)$ แต่เนื่องจาก $\cos(-\theta) = \cos \theta$ จึงอาจเขียนเป็น $v_{qs}^s \cos(\theta-120)$
 - 2.2 องค์ประกอบของ v_{ds}^s บนแกน bs คือ $v_{ds}^s \cos (90+(120-\theta))$ โดยมุม 90 องศา คือมุม

ระหว่าง d' กับ q' ส่วน $(120-\theta)$ คือมุมระหว่าง q' กับ bs . ใช้กฎการกระจายของฟังก์ชันตรีโกณมิติ จะสามารถเขียนใหม่ได้เป็น $v_{ds}^s [\cos 90\cos(120-\theta) - \sin 90\sin(120-\theta)]$ ซึ่งก็คือ $-v_{ds}^s \sin(120-\theta)$ แต่เนื่องจาก $-\sin\theta = \sin(-\theta)$ ดังนั้นจะได้ $-v_{ds}^s \sin(120-\theta) = v_{ds}^s \sin(\theta-120)$

3. พิจารณาองค์ประกอบของแรงดัน v_{ds}^s และ v_{qs}^s บนแกน cs

3.1 องค์ประกอบของ v_{qs}^s บนแกน cs คือ $v_{qs}^s \cos(120+\theta)$

3.2 องค์ประกอบของ v_{ds}^s บนแกน cs

มุมระหว่าง d' กับ cs คือ $360-(120+120+90-\theta) = 30+\theta$ แต่เนื่องจาก $\cos(30+\theta) = \sin(120+\theta)$ ดังนั้นจะได้ $v_{ds}^s \sin(\theta+120)$

จากผลการพิจารณาข้างต้น นำมาเขียนสมการของแรงดัน v_{as}, v_{bs} และ v_{cs} ให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 1 \\ \cos(\theta-120) & \sin(\theta-120) & 1 \\ \cos(\theta+120) & \sin(\theta+120) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{qs}^s \\ v_{ds}^s \\ v_{0s}^s \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

โดย v_{0s}^s คือ องค์ประกอบของแรงดันลำดับศูนย์ (zero-sequence component)

v_{0s}^s หรือองค์ประกอบแรงดันลำดับศูนย์นี้ ในภาวะที่เฟสทั้งสามเกิดสมดุล แรงดันลำดับศูนย์จะไม่ปรากฏ แต่ที่ควรเขียนไว้เนื่องจากทางด้านซ้ายมือของสมการมีสมาชิกอยู่ 3 ตัว ดังนั้นในพจน์ของ DC จึงต้องมีสมาชิกอยู่ 3 ตัวด้วย แต่ส่วนที่เป็นแรงดันลำดับศูนย์นี้ เมื่อไปปรากฏเป็นส่วนหนึ่งในสมการของ v_{as}, v_{bs} และ v_{cs} เฟสเซอร์หนึ่งหน่วยของแรงดันลำดับศูนย์ที่แฝงอยู่ในเฟสทั้งสามนี้ ก็จะเกิดสมดุลและหักล้างกันไปเอง

จากสมการข้างต้น ทำอินเวอร์สเมตริกซ์ จะได้

$$\begin{bmatrix} v_{qs}^s \\ v_{ds}^s \\ v_{0s}^s \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta-120) & \cos(\theta+120) \\ \sin\theta & \sin(\theta-120) & \sin(\theta+120) \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

เพื่อให้การพิจารณาเป็นไปได้ง่ายขึ้น จะกำหนดให้ $\theta = 0$ ซึ่งจะทำให้แกน q' ทับกับแกน as พอดี และเนื่องจากการพิจารณากระทำบนสมมติฐานที่ว่าแรงดันทั้ง 3 เฟสสมดุล ดังนั้นผลของแรงดันลำดับศูนย์ จะหักล้างกันไปเอง จึงสามารถแยกเขียนสมการให้ดูง่ายขึ้น ได้ดังนี้

$$v_{as} = v_{qs}^s \quad (2.5)$$

$$v_{bs} = -\frac{1}{2}v_{qs}^s - \frac{\sqrt{3}}{2}v_{ds}^s \quad (2.6)$$

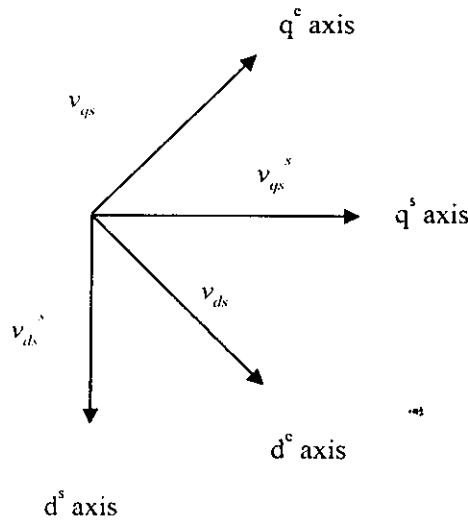
$$v_{cs} = -\frac{1}{2}v_{qs}^s + \frac{\sqrt{3}}{2}v_{ds}^s \quad (2.7)$$

และจากสมการที่ได้ทำอินเวอร์สเมตริกซ์ จะได้

$$v_{qs}^s = \frac{2}{3}v_{as} - \frac{1}{3}v_{bs} - \frac{1}{3}v_{cs} = v_{as} \quad (2.8)$$

$$v_{ds}^s = -\frac{1}{\sqrt{3}}v_{bs} + \frac{1}{\sqrt{3}}v_{cs} \quad (2.9)$$

แรงดันบนแกนอ้างอิงหยุดนิ่งนี้ สามารถแปลงไปอยู่บนแกนอ้างอิงที่หมุนด้วยความเร็วเชิงมุม ω_c ได้โดยใช้ภาพประกอบ 2-7 ช่วย



ภาพประกอบ 2-7 การแปลงแรงดันบนแกนอ้างอิงหยุดนิ่ง ไปอยู่บนแกนอ้างอิงที่หมุนด้วยความเร็วเชิงมุม ω_c (Bimal K. Bose, 1986)

เพื่อให้ง่ายต่อการเขียน เราจะเขียน v_{ds} และ v_{qs} ซึ่งอยู่บนแกน d^s และ q^s โดยละเว้นการเขียนตัวห้อย e ไว้ข้างบน

จากภาพประกอบ 2-7 จะได้ว่า

$$v_{qs}^c = v_{qs}^s \cos \omega_c t - v_{ds}^s \sin \omega_c t \quad (2.10)$$

$$v_{ds}^c = v_{qs}^s \sin \omega_c t + v_{ds}^s \cos \omega_c t \quad (2.11)$$

และสามารถแปลงแกนเคลื่อนที่ให้มาอยู่บนแกนหยุดนิ่งได้ดังนี้

$$v_{qs}^s = v_{qs}^c \cos \omega_c t + v_{ds}^c \sin \omega_c t \quad (2.12)$$

$$v_{ds}^s = -v_{qs}^c \sin \omega_c t + v_{ds}^c \cos \omega_c t \quad (2.13)$$

เพื่อให้เห็นภาพที่ชัดเจนมากขึ้น ให้พิจารณาตัวอย่างดังต่อไปนี้

$$v_{as} = V_{sm} \cos \omega_c t \quad (2.14)$$

$$v_{bs} = V_{sm} \cos(\omega_c t - 120) \quad (2.15)$$

$$v_{cs} = V_{sm} \cos(\omega_e t + 120) \quad (2.16)$$

ทำการแปลงแรงดันทั้ง 3 เฟสให้ไปอยู่บนแกน q' และ d' จะได้

$$v_{qs}^s = V_{sm} \cos \omega_e t \quad (2.17)$$

$$v_{ds}^s = -V_{sm} \sin \omega_e t \quad (2.18)$$

จากนั้นก็แปลงแรงดันบนแกนหยุดนิ่งให้ไปอยู่บนแกนที่เคลื่อนที่ จะได้

$$v_{qs} = V_{sm} = \hat{V}_m \quad (2.19)$$

$$v_{ds} = 0 \quad (2.20)$$

เมื่อ V_m เป็นแรงดันเทียบเท่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เพราะไม่มีส่วนของคลื่นรูปไซน์เข้ามาเกี่ยวข้อง

จากความสัมพันธ์ตามสมการข้างต้น จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส ซึ่งมีลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์และมีความเร็วเชิงมุม ω_e เมื่อสังเกตบนแกนหยุดนิ่ง กลับไปปรากฏเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงบนแกนที่หมุนด้วยความเร็วเชิงโคโรนัส ω_e และสิ่งที่สังเกตได้อีกอย่างหนึ่งก็คือแรงดันที่ไปปรากฏนั้น จะเป็นแรงดันซึ่งอยู่บนแกน q ซึ่งแกน q นี้ถ้าเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงคือ แกนของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากโรเตอร์ และขดลวดซึ่งอยู่บนโรเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงนั้นคืออาร์เมเจอร์ ในขณะที่แรงดันบนแกน q ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ เกิดจากการจ่ายไฟเข้าทางสเตเตอร์ ซึ่งเป็นที่วางขดลวดอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์กระแสสลับเช่นกัน ดังนั้นถ้ามองในมุมของแกน $d-q$ แล้ว อาร์เมเจอร์ของมอเตอร์กระแสตรง ซึ่งอยู่บนโรเตอร์ ก็คือ อาร์เมเจอร์ของมอเตอร์กระแสสลับ ซึ่งอยู่บนสเตเตอร์นั่นเอง และจากสมการ $v_{ds} = 0$ ก็เพราะว่ายังไม่พิจารณาถึงแรงเคลื่อนไฟฟ้าบนโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับนั่นเอง

2.1.3 หลักการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นมอเตอร์ที่มีความเร็วคงที่ เมื่อต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟที่มีแรงดันคงที่และความถี่คงที่ ความเร็ว ณ จุดทำงานจะใกล้เคียงกับความเร็วเชิงโคโรนัสมาก ถ้าแรงบิดของภาระเพิ่มขึ้น ความเร็วของมอเตอร์จะตกลงเล็กน้อย ดังนั้นมอเตอร์เหนี่ยวนำ จึงเหมาะกับงานที่ต้องการความเร็วคงที่ อย่างไรก็ตามมีงานเป็นจำนวนมากในโรงงานอุตสาหกรรมที่ต้องการความเร็วหลายความเร็ว หรือต้องการความเร็วที่ปรับได้อย่างต่อเนื่อง วิธีที่การควบคุมความเร็วที่ใช้กันอยู่ จะใช้มอเตอร์กระแสตรงซึ่งมีราคาแพง ต้องบำรุงรักษาคอมมิวเตเตอร์ และแปรงถ่านเป็นประจำ มีมลภาวะต่อบรรยากาศ ทางเลือกในปัจจุบันจะใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำกรงกระรอก ซึ่งมีราคาถูกทนทาน ไม่มีคอมมิวเตเตอร์ และแปรงถ่าน เหมาะสำหรับการควบคุมความเร็วสูง แต่ข้อเสียของมอเตอร์เหนี่ยวนำคือ มีค่าตัวประกอบกำลังต่ำหลังและมีค่าต่ำ ดังนั้น โรงงานอุตสาหกรรมที่มี

มอเตอร์เหนี่ยวนำจำนวนมาก จะต้องมีการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง เพื่อไม่ให้ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมีค่ามากเกินไป และเป็นภาระสิ้นเปลืองค่าไฟฟ้าโดยไม่จำเป็นอีกด้วย

สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ มีหลักการควบคุมความเร็ว คือ ต้องควบคุมความเร็วซิงโครนัสให้ได้จึงจะสามารถควบคุมความเร็วของโรเตอร์ได้ ดังสมการ

$$n_s = \frac{120f}{P} \quad (2.21)$$

$$n_r = \frac{(1-S)120f}{P} \quad (2.22)$$

เมื่อ n_s คือความเร็วซิงโครนัส และ n_r คือความเร็วของโรเตอร์

จากสมการข้างต้น พบว่าสามารถควบคุมได้ 3 กรณี

2.1.3.1 การควบคุมความเร็วโดยการเปลี่ยนขั้วแม่เหล็ก

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่มีโรเตอร์แบบกรงกระรอก ถ้าเปลี่ยนแปลงการต่อปลายของขดลวดสเตเตอร์ใหม่ สามารถทำให้ขั้วแม่เหล็กต่อเฟสที่เกิดขึ้นบนสเตเตอร์เปลี่ยนแปลงได้ ผลคือความเร็วของมอเตอร์จะเปลี่ยนแปลงไป แต่การเปลี่ยนแปลงนี้ จะเปลี่ยนแปลงความเร็วเป็นขั้น ๆ ไม่เรียบเหมือนวิธีอื่น ๆ เช่น เปลี่ยนขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์จาก 4 ขั้ว ไปเป็น 8 ขั้ว จะสามารถเปลี่ยนความเร็วจาก 1,500 rpm เป็น 750 rpm (ที่ความถี่ไฟสลับ 50Hz)

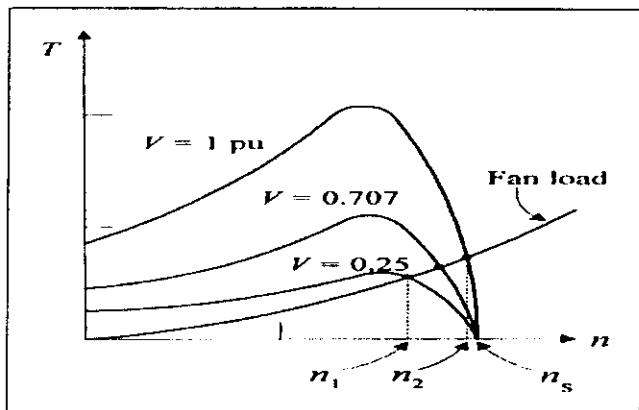
2.1.3.2 การควบคุมความเร็วโดยควบคุมความถี่และสลิป

2.1.3.2.1 การควบคุมแบบความถี่คงที่

แรงบิดที่เกิดขึ้นในมอเตอร์จะแปรผันกับแรงดันขั้วยกกำลังสอง คุณสมบัติระหว่าง T-n ที่แรงดันขั้วต่างๆ กัน แสดงไว้ดังภาพประกอบ 2-8 ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ถูกควบคุมความเร็วด้วยวิธีนี้ จะถูกกำหนดด้วยทอร์กของภาระ ซึ่ง จุดตัดระหว่างแผนภูมิแสดงทอร์กของภาระกับทอร์กของมอเตอร์ คือ จุดที่สามารถปรับความเร็วรอบได้

จากภาพประกอบ 2-8 ถ้ามอเตอร์ขับภาระที่เป็นพัลลม มอเตอร์สามารถเปลี่ยนแปลงความเร็ว ในช่วง n_1 ถึง n_2 ด้วยการเปลี่ยนแรงดันขั้ว

การควบคุมความเร็ว ด้วยวิธีนี้ สลิปจะมีค่าสูงขึ้น เมื่อความเร็วมีค่าลดลง ทำให้การทำงานไม่มีประสิทธิภาพ และความเร็วเปลี่ยนแปลงในย่านแคบ ๆ เท่านั้น แต่ยังมีความเหมาะสมกับการควบคุมความเร็วของภาระประเภทพัลลม, บีบ และภาระที่อาศัยแรงเหวี่ยง



ภาพประกอบ 2-8 คุณลักษณะแรงบิดกับความเร็วสำหรับแรงดันชั่วต่างๆ กัน
(ปริพนธ์ พัฒนศักดิ์วงศ์,2544)

2.1.3.2.2 การควบคุมความถี่ปรับค่า

การควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ด้วยการควบคุมความถี่ที่ปรับค่าได้นั้น เป็นวิธีที่นิยมกันอย่างกว้างขวาง เพราะว่าย่านของการควบคุมความเร็วกว้างมากกว่าวิธีอื่น ๆ การปรับค่าความถี่ของแหล่งจ่ายไฟสลับ 3 เฟส ที่ป้อนให้กับสเตเตอร์ของมอเตอร์ มี 2 วิธี

- วิธีควบคุมโดยตรงโดยใช้วงจรไซโคลคอนเวอร์เตอร์
- วิธีควบคุมโดยการเชื่อมโยงโดยใช้อินเวอร์เตอร์

จากโครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะเกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำต่อเฟส ดังนี้

$$E_{rms} = 4.44fN_{ph} \Psi_p K_w \tag{2.23}$$

- โดยที่
- N_{ph} คือ จำนวนรอบขดลวดที่ต่ออนุกรมกันต่อเฟส
 - Ψ_p คือ ฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้า
 - K_w คือ winding factor อยู่ในช่วง 0.85-0.95
 - f คือ ความถี่

ดังนั้นฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์มีค่า ดังนี้

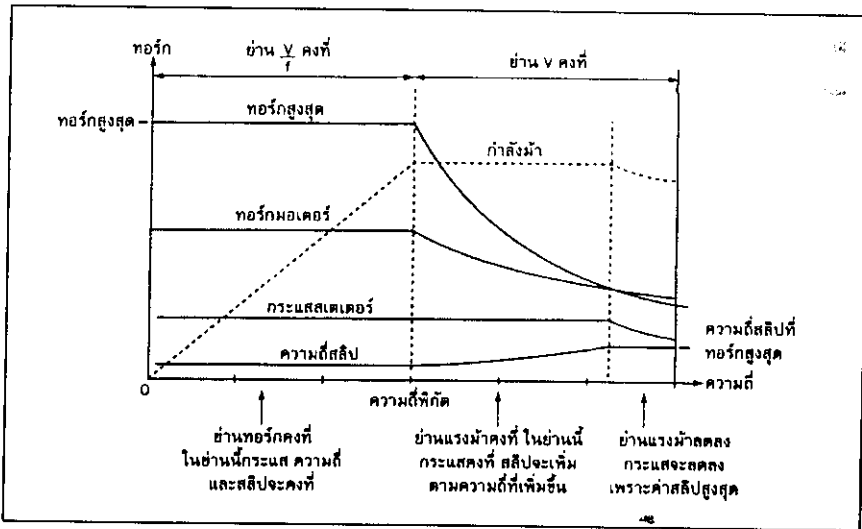
$$\Psi_p \propto E/f \tag{2.24}$$

ถ้าแรงดันที่ตกคร่อม R_1 และ X_1 มีค่าน้อย สามารถประมาณค่าให้ $V_1 = E$, จะได้

$$\Psi_p \propto V/f \tag{2.25}$$

จากสมการความสัมพันธ์ข้างต้น พบว่าวิธีการควบคุมความถี่ ยังคงมีขีดจำกัด เนื่องจากความต้องการในการรักษาเทอร์กของมอเตอร์ให้คงที่ทุก ๆ ย่านความถี่ ดังนั้น วิธีการควบคุมความถี่ปรับค่า จึงต้องพยายามควบคุมแรงดันที่ป้อนเข้ามอเตอร์ไปด้วยกัน เพื่อให้อัตราส่วนระหว่าง V/f

คงที่ (constant voltage per hertz) เมื่อ V คือ แรงดันไฟสลับ 3 เฟสที่ป้อนเข้ามอเตอร์ และ f คือ ความถี่ไฟสลับ 3 เฟส ที่ป้อนเข้ามอเตอร์ อย่างไรก็ตาม วิธีควบคุม V/f ยังมีขีดจำกัดเนื่องจากการเพิ่ม V ไม่สามารถเพิ่มให้สูงกว่าค่าแรงดันสูงสุดที่มอเตอร์สามารถทนได้ ดังนั้นที่ความถี่ f สูงกว่าความถี่เชิงโครนัส แรงดัน V จะต้องคงที่ ไม่สามารถเพิ่มได้อีก



ภาพประกอบ 2-9 คุณลักษณะของการควบคุมความเร็วมอเตอร์ เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลง โดยแสดงความสัมพันธ์ของทอร์กของมอเตอร์ กระแส ความถี่และค่าลลป

(นภัทร วัฒนเทพินทร์และประเสริฐ ปิ่นปฐมรัฐ, 2544)

สำหรับส่วนของแหล่งจ่ายไฟให้กับมอเตอร์ ได้ใช้อินเวอร์เตอร์ ซึ่งในปัจจุบัน อินเวอร์เตอร์ได้แบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1. อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน (voltage-fed inverter) จะมีภาคเรกติไฟเออร์ ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันให้กับอินเวอร์เตอร์ กล่าวคือ ณ ค่าแรงดันใด ๆ ที่เรกติไฟเออร์ถูกสั่งให้คงค่าไว้ เมื่อภาระเปลี่ยน แรงดันจะคงที่แต่กระแสจะเปลี่ยนตามภาระ
2. อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส (current-fed inverter) จะมีภาคเรกติไฟเออร์ ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสให้กับอินเวอร์เตอร์ โดยที่ ณ ค่ากระแสค่าใดค่าหนึ่ง เมื่อเปลี่ยนภาระกระแสจะคงที่ แต่แรงดันเปลี่ยนตามภาระ

ในงานวิจัยชิ้นนี้ ได้ใช้หลักการควบคุมความเร็ว โดยการควบคุมความถี่ ด้วยวิธีควบคุมโดยการเชื่อมโยงโดยใช้อินเวอร์เตอร์ ซึ่งอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ จะเป็นอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันชนิดมอดูเลตความกว้างของพัลส์แบบไซน์ (sinusoidal pulse width modulation) ซึ่งทำหน้าที่ในการแปลงแรงดันไฟตรงที่มีขนาดคงที่ให้เป็นแรงดันไฟสลับ ซึ่งแรงดันที่ได้นี้ เราสามารถทำการปรับ

ค่าความถี่และค่าแรงดันได้โดยการปรับรูปแบบการสวิตซ์ที่อินเวอร์เตอร์เพียงอย่างเดียว ด้วยเทคนิคนี้การมอดูเลตความกว้างของพัลส์แบบไซน์

การนำอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน ชนิดมอดูเลตความกว้างของพัลส์แบบไซน์มาใช้ นั้น เนื่องจากเทคนิคนี้นอกจากที่จะปรับความถี่ได้ตามปกติแล้ว ยังสามารถที่จะปรับแรงดันในเวลาเดียวกันได้อีกด้วย ซึ่งจะทำให้ เส้นแรงแม่เหล็กในช่องอากาศของมอเตอร์เหนี่ยวนำคงที่ นั่นคือ การรักษ้อัตราส่วน ของ V/f ให้คงที่ได้ เพื่อผลของการควบคุมค่าทอร์กของมอเตอร์ให้คงที่ในย่านความเร็วต่าง ๆ นั้นเอง โดยเทคนิคนี้ จะเป็นการเอาสัญญาณรูปคลื่นไซน์มามอดูเลตกับสัญญาณคลื่นสามเหลี่ยม ซึ่งสัญญาณรูปคลื่นไซน์นี้ ถือเป็นสัญญาณความถี่มูลฐาน ซึ่งเป็นความถี่เดียวกับความถี่มูลฐานที่มอเตอร์จะได้รับ ส่วนสัญญาณคลื่นสามเหลี่ยม เรียกว่าคลื่นพาหะ ซึ่งทำหน้าที่ร่วมกับสัญญาณความถี่มูลฐาน เพื่อปรับให้ระดับแรงดัน rms เปลี่ยนแปลงไป เพื่อคงไว้ซึ่ง V/f คงที่

2.2 ทฤษฎีฟัซซี่ลอจิก

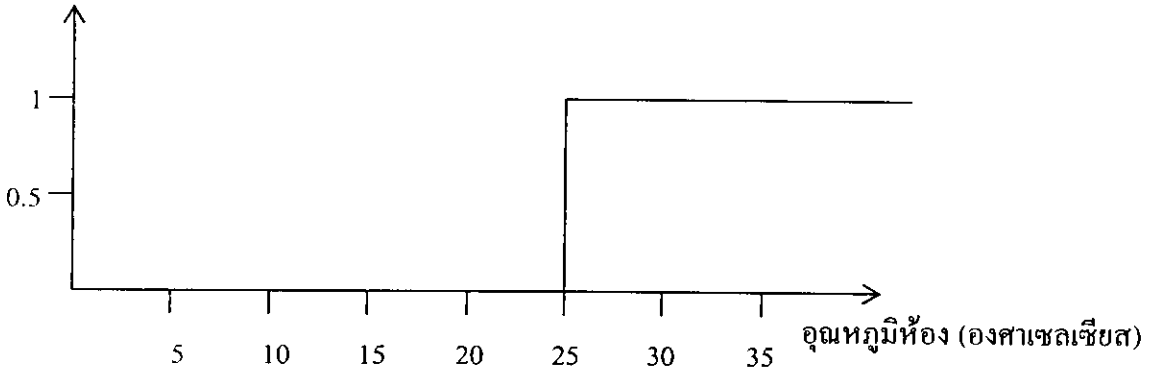
ความหมายของคำว่า “ฟัซซี่ลอจิก” คือ ลอจิกที่คลุมเคลือไม่ชัดเจน เนื่องจากเป็นความไม่ชัดเจนทางคณิตศาสตร์ที่ตั้งอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีฟัซซี่เซต (fuzzy set theorem) ซึ่งผู้คิดค้นคือนายลอตฟี ซาเดห์ (Lotfi Zadah) แห่งมหาวิทยาลัยแคลิฟลอเนียเบิร์กลีย์ ในปีค.ศ.1965 โดยซาเดห์ได้ให้ข้อสังเกตไว้ว่า “ระบบควบคุมที่มีความซับซ้อนมากขึ้น ความต้องการค่าที่แน่นอนนั้นแทบไม่จำเป็น” และสมมติฐานดังกล่าวได้กลายเป็นข้อกำหนดของระบบและกฎการควบคุมแบบอัตโนมัติในเวลาต่อมา กล่าวคือ ฟัซซี่ลอจิกจะให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงต่อความเที่ยงตรงตามความรู้สึกของมนุษย์ เช่น ระบบที่มีความเที่ยงตรงสูง สามารถทำให้ตำแหน่งของมอเตอร์ไม่มีความผิดพลาดเลย ส่วนตัวควบคุมแบบฟัซซี่ อาจจะทำให้เกิดค่าความผิดพลาดไม่เกิน 0.01 มิลลิเมตร ซึ่งความเที่ยงตรงสูงเป็นพิเศษนี้อาจเป็นสิ่งที่มากเกินไปจนงาน เนื่องจากความผิดพลาดดังกล่าวอาจจะไม่ส่งผลกระทบต่อชิ้นงานที่จะผลิต

2.2.1 ทฤษฎีฟัซซี่เซต

ทฤษฎีฟัซซี่เซตเป็นการรวมสมาชิกของหลาย ๆ เซตดั้งเดิมที่มีอยู่จริงและพหุมีลักษณะที่รวมกลุ่มกันได้ โดยฟัซซี่เซตยอมรับความเป็นสมาชิกเพียงบางส่วน ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงทีละน้อยระหว่างการมีคุณสมบัติความเป็นสมาชิกครบถ้วนกับไม่มีคุณสมบัติของความเป็นสมาชิกเลย ระบบฟัซซี่ลอจิกสามารถทำงานได้หากมีส่วนของสมาชิกที่มีลักษณะที่ถูกเพียงบางส่วนและผิดเพียงบางส่วนโดยมีค่าความเป็นสมาชิกต่างกัน อยู่ระหว่าง 0 และ 1 ดังภาพประกอบ 2-10 แสดงความ

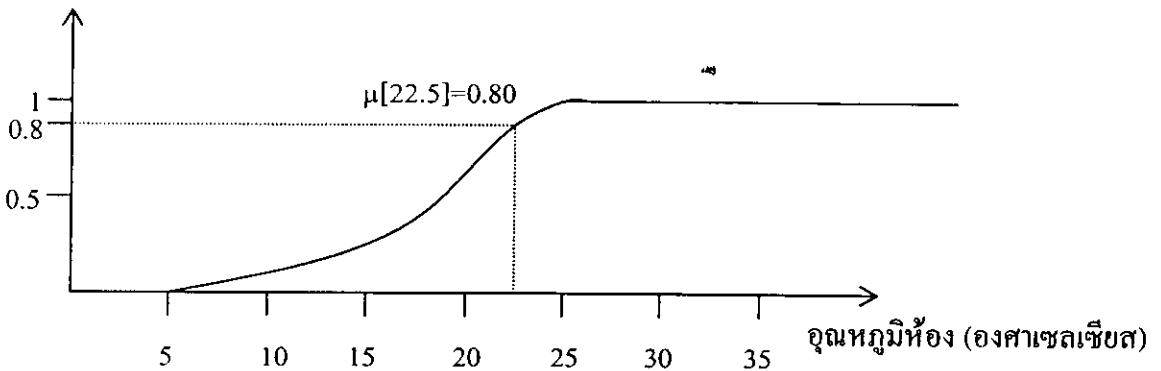
แตกต่างของเซตดั้งเดิมหรือลอจิกทั่วไป (a) กับ ฟัชชีเซตหรือฟัชชีลอจิก (b) ที่ต่างก็แสดงความ เป็นสมาชิกของอุณหภูมิห้อง

ความเป็นสมาชิก (μ)



(a) ลอจิกทั่วไป

ความเป็นสมาชิก (μ)



(b) ฟัชชีลอจิก

ภาพประกอบ 2-10 แสดงความเป็นสมาชิกของเซตดั้งเดิม (a) กับ ฟัชชีเซต (b)

ภาพประกอบ 2-10 (a) เป็นการแสดงชี้ให้เห็นชัดว่า อุณหภูมิที่สูงมากกว่า หรือสูงเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิสูง (ลอจิก 1) แต่ถ้าน้อยกว่า 25 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิต่ำ (ลอจิก 0) ส่วนภาพประกอบ 2-10 (b) แสดงความต่อเนื่องของความเป็นสมาชิกอุณหภูมิห้อง โดยที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส บอกได้ชัดเจนว่าไม่ใช่อุณหภูมิสูง แต่ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ตอบได้ว่าเป็นอุณหภูมิสูง และถ้าที่อุณหภูมิ 22.5 องศาเซลเซียส ถือว่าอุณหภูมิสูง 80% หรือมีค่าความเป็นสมาชิกของอุณหภูมิเท่ากับ 0.80 และที่อุณหภูมิ 17.5 องศาเซลเซียส มีค่าความเป็นสมาชิกของอุณหภูมิ

เท่ากับ 0.50 ส่วนเส้นโค้งในรูปเรียกว่า ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟuzzyเซต “อุณหภูมิห้อง” นั่นคือ ทุกค่าจะมีความเป็นสมาชิกของอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ช่วงอุณหภูมิที่เป็นไปได้ตั้งแต่ 0 ถึง 50 องศาเซลเซียส เรียกว่าเอกภพสัมพัทธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้พจน์ชณะตัวใหญ่ (เช่น A) แทนฟuzzyเซต สมาชิกของเอกภพสัมพัทธ์ เขียนแทนด้วย $x \in U$ เมื่อ x คือ สมาชิกของเอกภพสัมพัทธ์ และ U คือ เอกภพสัมพัทธ์ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ A เขียนแทนด้วย $\mu_A(x)$

2.2.2 ฟuzzyเซต

ฟuzzyเซต คือ เซตคู่ลำดับของสมาชิกในเอกภพสัมพัทธ์ที่สนใจและระดับความเป็นสมาชิก เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in U\} \quad (2.26)$$

ถ้า U เป็นค่าต่อเนื่อง ฟuzzyเซต A สามารถเขียนแทนด้วยสมการ (2.27)

$$A = \int \mu_A(x) / x \quad (2.27)$$

เครื่องหมาย " \int " หมายถึง การทำยูเนียนตามทฤษฎีเซต และเครื่องหมาย " $/$ " ไม่ได้หมายถึงการหาร แต่เป็นการแทนความสัมพันธ์ของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์

ถ้า A เป็นค่าไม่ต่อเนื่อง มีขอบเขต สามารถกำหนดฟuzzyเซต ได้ดังนี้

$$A = \sum_U \mu_A(x) / x \quad (2.28)$$

2.2.3 ซัพพอร์ตของฟuzzyเซต

ซัพพอร์ตของฟuzzyเซต (support of fuzzy set) A ในเอกภพสัมพัทธ์ U คือฟuzzyเซตที่มีสมาชิกทั้งหมดในเอกภพสัมพัทธ์ ที่มีค่าระดับความเป็นสมาชิกในฟuzzyเซต A มากกว่าศูนย์ เขียนแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

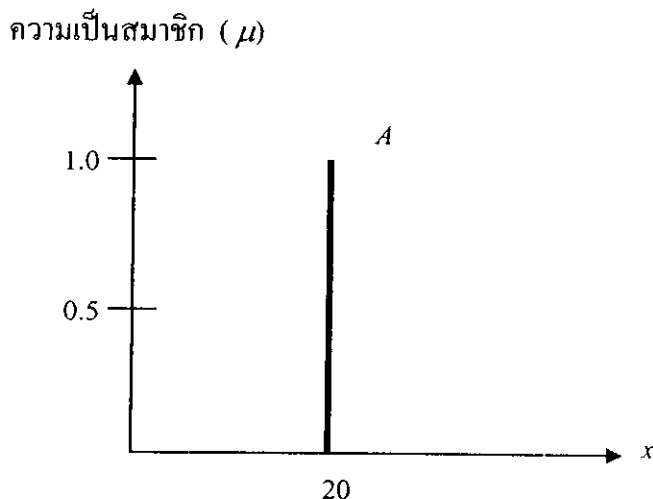
$$\text{sup } p(A) = \{x \in U | \mu_A(x) > 0\} \quad (2.29)$$

ศูนย์กลางของฟuzzyเซต คือ ค่ากึ่งกลางของฟuzzyเซต หรือค่าสูงสุดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

จุดแบ่งของฟuzzyเซต คือ จุดใด ๆ ในเอกภพสัมพัทธ์ ที่มีความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0.5 ความสูงของฟuzzyเซต คือ ค่าสูงสุดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

2.2.4 ชิงเกิดตันฟัซซี่เซต

ฟัซซี่ชิงเกิดตันเซตคือ ฟัซซี่เซตที่มีค่าความเป็นสมาชิกของเอกภพสัมพัทธ์เพียงหนึ่งสมาชิก จากภาพประกอบ 2-11 แสดงชิงเกิดตันฟัซซี่เซต ที่มีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับศูนย์ทุกตำแหน่ง ยกเว้นที่ $x = 20$



ภาพประกอบ 2-11 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของชิงเกิดตันฟัซซี่เซต

2.3 การปฏิบัติการฟัซซี่ลอจิก

การปฏิบัติการทางฟัซซี่เซตลอจิกมีพื้นฐานปฏิบัติการต่าง ๆ เช่นเดียวกับการปฏิบัติการของ เซตแบบดั้งเดิมที่ประกอบไปด้วย อินเตอร์เซกชัน ยูเนียน และคอมพลิเมนต์

อินเตอร์เซกชันเป็นตัวปฏิบัติการที่แทนการกระทำทางลอจิก AND มีสัญลักษณ์ \cap แทน การปฏิบัติการ สามารถกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ $A \cap B$ หรือ $A \text{ AND } B$ ดังนี้

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) \quad (2.30)$$

เมื่อ \wedge แทนการกระทำ min

ยูเนียนเป็นตัวปฏิบัติการที่แทนการกระทำทางลอจิก OR มีสัญลักษณ์ \cup แทนการ ปฏิบัติการ สามารถกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ $A \cup B$ หรือ $A \text{ OR } B$ ดังนี้

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) \quad (2.31)$$

คอมพลิเมนต์ของ ฟัซซี่เซต A เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ \bar{A} ($\neg A$, $\text{NOT } A$) สามารถ กำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกดังนี้

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (2.32)$$

2.4 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

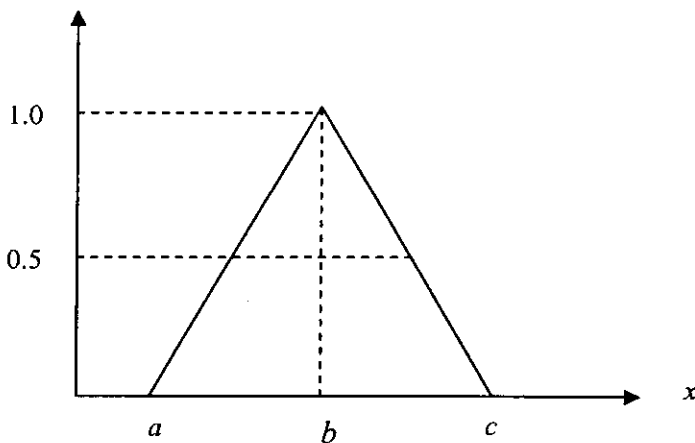
กำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกได้แบ่งออกเป็นสองอย่างคือ การกำหนดเป็นตัวเลขและการกำหนดเป็นฟังก์ชัน การนิยามเชิงตัวเลขแสดงขีดสูงสุดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟuzzy เซตนั้นเป็นเวกเตอร์ของจำนวนซึ่งขนาดขึ้นอยู่กับระดับของการแบ่งย่อย การนิยามฟังก์ชันเป็นการกำหนดสมาชิกของฟuzzy เซตสำหรับแสดงให้เห็นเชิงวิเคราะห์ ซึ่งแบ่งสมาชิก (membership grade) ขององค์ประกอบแต่ละตัวในเอกภพสัมพัทธ์ที่กำหนดได้ ลักษณะการกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟuzzy เซตที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่

2.4.1 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยม (Δ หรือ T- function)

กำหนดนิยามในดังต่อไปนี้

$$T(x; a, b, c) = \left\{ \begin{array}{l} 0 \text{ เมื่อ } x \leq a, \frac{(x-a)}{(b-a)} \text{ เมื่อ } a \leq x \leq b \\ \frac{(c-x)}{(c-b)} \text{ เมื่อ } b \leq x \leq c, 0 \text{ เมื่อ } x > c \end{array} \right\} \quad (2.33)$$

ความเป็นสมาชิก (μ)



ภาพประกอบ 2-12 พารามิเตอร์และรูปทรงของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยม

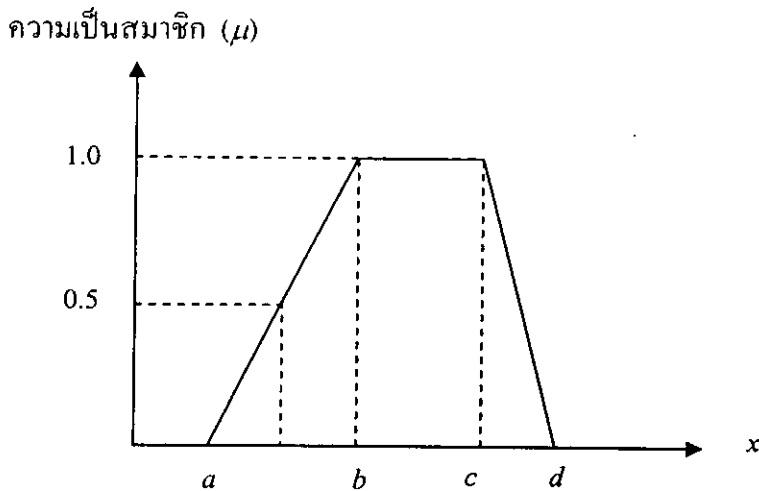
ฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยม หรือแบบ T เป็นฟังก์ชันที่มีลักษณะรูปร่างแน่นอน ซึ่งถูกพิจารณาถึงคุณสมบัติโดยการเลือกพารามิเตอร์ a, b, c ดังแสดงในภาพประกอบ 2-12 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบนี้ปกติใช้กำหนดคุณสมบัติสมาชิกไม่เป็น 0 ทั้งค่า x มากและ x น้อย

2.4.2 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสี่เหลี่ยมคางหมู

กำหนดพารามิเตอร์ได้ 4 พารามิเตอร์ดังนี้

$$(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}; & a \leq x \leq b \\ 1; & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}; & c \leq x \leq d \\ 0; & d \leq x \end{cases} \quad (2.34)$$

เมื่อ $a < b < c < d$ พารามิเตอร์ (a, b, c, d) เป็นตัวตัดสินค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ $c - u$



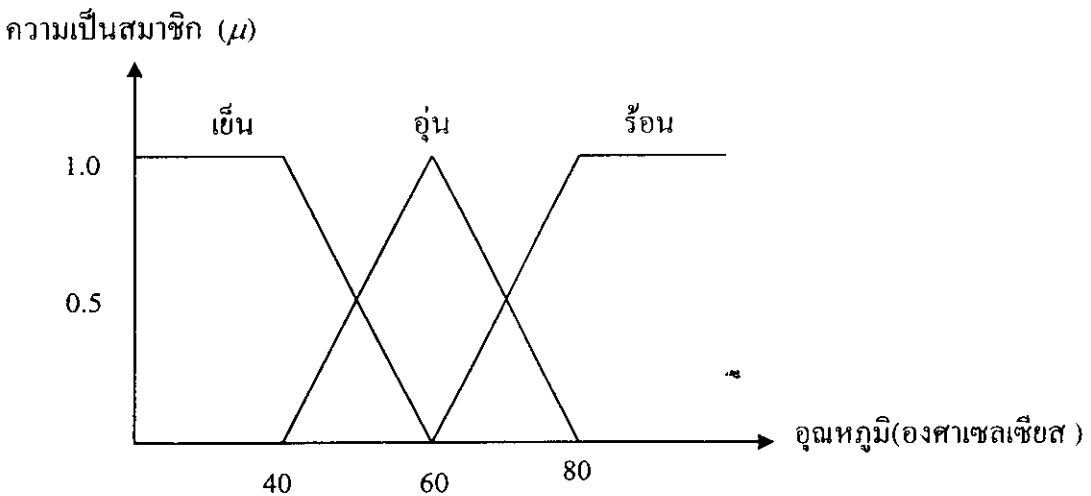
ภาพประกอบ 2-13 พารามิเตอร์และรูปทรงของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสี่เหลี่ยมคางหมู

จากภาพประกอบ 2-13 เป็นฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสี่เหลี่ยมคางหมูที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง แต่มีข้อดีของการเป็นเส้นตรงที่ไม่มีความราบเรียบของจุดที่เป็นมุมของเส้นตรง

2.5 ตัวแปรทางภาษา

ตัวแปรทางภาษา (linguistic variables) คือ คำพูดหรือประโยคทางธรรมชาติที่สามารถเข้าใจได้ทั่วไป ในการให้ความหมายเพื่อความสะดวกสำหรับการวิเคราะห์ระบบ การประมาณการ สรุปข้อมูลและตีความจำนวนเซตดั้งเดิมในเทอมของฟัซซี่เซต

ตัวอย่างของตัวแปรภาษาในส่วนของอุณหภูมิ เช่น เย็น อุ่น และร้อน โดยนำตัวแปรภาษาดังกล่าวไปกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซต



ภาพประกอบ 2-14 ตัวแปรภาษากำหนดอุณหภูมิ

จากภาพประกอบ 2-14 ประกอบด้วยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซตของอุณหภูมิ 3 ฟังก์ชัน คือ เย็น, อุ่น และร้อน

ตัวแปรทางภาษาถูกนิยามด้วยฟังก์ชัน 4 เทอม คือ $(x, T(x), U, M)$ โดยที่

x คือ ชื่อตัวแปร เช่น อุณหภูมิ เป็นต้น

$T(x)$ คือ เซตตัวแปรทั้งหมดของตัวแปร x {เช่น เย็น, อุ่น และร้อน}

U คือ เอกภพสัมพัทธ์ของ x เช่น $(0, V_{\max})$

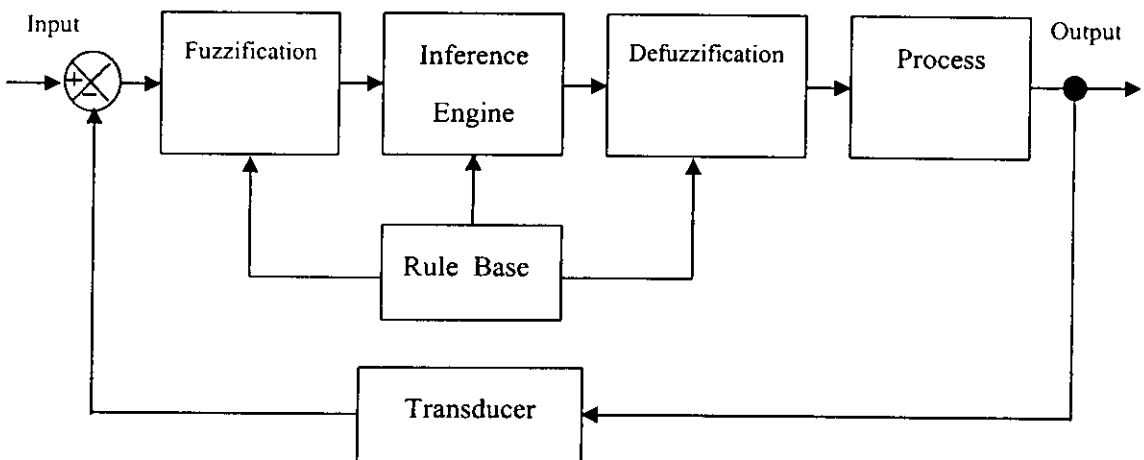
M คือ ความสัมพันธ์ของ x แต่ละค่า

2.6 ตัวควบคุมฟuzzyลอจิก

ตัวควบคุมฟuzzyลอจิก (fuzzy logic controller) สามารถแบ่งได้ 2 ชนิด คือ ชนิดแมมดานิ (Mamdani type) และชนิดทากาจิ-ซูกะโน (Takagi-Sugeno type) หรือเรียกชื่อย่อว่า ชนิดทีเอส (TS type) โดยเรียกตัวควบคุมฟuzzyลอจิกที่ใช้กฎทีเอสว่า ตัวควบคุมทีเอสฟuzzyลอจิก และเรียกตัวควบคุมที่ใช้กฎแมมดานิฟuzzyลอจิกว่า ตัวควบคุมแมมดานิฟuzzyลอจิก หรือในบางครั้งเมื่อกล่าวถึงตัวควบคุมฟuzzyลอจิกทั่ว ๆ ไปก็จะหมายถึงตัวควบคุมแมมดานิฟuzzyลอจิก

2.6.1 ฟuzzyฟิเคชัน

การฟuzzyฟิเคชัน ทำหน้าที่แปลงข้อมูลแบบธรรมดาให้ไปอยู่ในรูปของตัวแปรทางภาษาหรือตัวแปรฟuzzyลอจิก การแปลงข้อมูลทางด้านอินพุตที่ประกอบด้วยเซตของค่าผิดพลาด (error: e) และเซตของอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาด (change of error: ce) ของค่าเป้าหมายและค่าที่วัดได้ตามลำดับ จากภาพประกอบ 2-15 แสดงระบบควบคุมฟuzzyที่มีด้วยตัวควบคุมฟuzzyลอจิกที่ประกอบด้วย ฟuzzyฟิเคชัน ฐานความรู้ กลไกอนุมาน ดีฟuzzyฟิเคชัน กระบวนการ และทรานสดิวเซอร์



ภาพประกอบ 2-15 ระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมฟuzzy

การเลือกจำนวนและลักษณะรูปร่างของฟuzzyเซต คือพารามิเตอร์หนึ่งในการออกแบบตัวควบคุมฟuzzyลอจิก ซึ่งขึ้นอยู่กับการตัดสินใจของผู้ออกแบบโดยอาศัยหลักเกณฑ์ต่าง ๆ เช่น ความรู้และประสบการณ์ที่มีต่อกระบวนการที่จะควบคุม เพราะไม่มีหลักการและขั้นตอนทางคณิตศาสตร์ในการเลือกอินพุตฟuzzyเซต โดยทั่วไปจำนวนฟuzzyเซตสำหรับแต่ละตัวแปรอินพุตอาจจะเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้ แต่อยู่ในช่วง 2 ถึง 13 ฟuzzyเซต (ไม่ควรมากกว่านี้)

2.6.2 ฐานความรู้ฟuzzyลอจิก

ฐานความรู้ฟuzzyลอจิกประกอบด้วยส่วนสำคัญสองส่วน คือ ฐานข้อมูล (database) เป็นส่วนที่ใช้สำหรับเก็บฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟuzzyเซต และสเกลที่ใช้ในการนอร์มอลไลเซชัน (normalization) และฐานกฎ (rule base) เป็นส่วนที่เก็บกฎที่ใช้ในการควบคุมระบบ ซึ่งอยู่ในรูปของ IF-THEN คือ IF (process state) THEN (control output) เมื่อ process state เป็นอินพุตฟuzzyเซต และ control output เป็นเอาต์พุตฟuzzyเซต

จำนวนกฎฟuzzyลอจิกจะสัมพันธ์กับจำนวนอินพุตฟuzzyเซต นั่นคือ ถ้า e เป็นอินพุตฟuzzyเซตของค่าผิดพลาด และ ce ซึ่งเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาดที่มีจำนวนอินพุตฟuzzyเซตเท่ากับ N_1 และ N_2 แล้ว กฎฟuzzyลอจิกสามารถมีได้มากที่สุด $N_1 \times N_2$ กฎ ในทางปฏิบัติอาจมีน้อยกว่าได้ และในการออกแบบกฎฟuzzyลอจิกนั้น อาศัยหลักการเกี่ยวกับการออกแบบอินพุตฟuzzyเซตคือ ใช้ความรู้และประสบการณ์ที่มีต่อกระบวนการที่ถูกควบคุม โดยอยู่บนพื้นฐานของการลองผิดลองถูกจนได้ผลตอบสนองเป็นที่พอใจ

2.6.3 กลไกอนุมาน

หน่วยกลไกอนุมานทำหน้าที่หาผลลัพธ์ของกฎการควบคุมจากค่าตัวแปรอินพุตฟuzzyเซตค่าความเป็นสมาชิกที่ได้จากปฏิบัติการฟuzzyลอจิกในส่วนมูลเหตุ (antecedent) และเงื่อนไขโดยทั่วไป การเชื่อมโยงของเหตุผลจะมี 2 ชนิด คือ

- Generalized modus ponens (GMP) คือการสรุปจากเหตุไปหาผล
- Generalized modus tollens (GMT) คือการสรุปจากผลไปหาเหตุ

รูปแบบของทั้ง 2 วิธีมีดังนี้

GMP :

Premise : x is A'

Implication : if x is A then y is B

Consequence : y is B'

GMT :

Premise : y is B'

Implication : if x is A then y is B

Consequence : x is A'

โดย

A, A', B, B'	คือ ฟัซซี่เซต
x, y	คือ ตัวแปรทางภาษา
$\mu_R(x, y)$	คือ ค่าความเป็นสมาชิกของความสัมพันธ์ของ A และ B
$\mu_A(x), \mu_B(y)$	คือ ค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปร x และ y
f_{imp}	คือ ฟังก์ชันการอิมพลีเคชัน (implication) หรือฟังก์ชันการเชื่อมโยงค่าความเป็นสมาชิกของความสัมพันธ์ฟัซซี่ลอจิก

$$\mu_R(x, y) = f_{imp}(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad ; \quad x \in U, y \in V \quad (2.35)$$

โดยทั่วไป ในการสร้างตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกจะนิยมใช้การเชื่อมโยงแบบ GMP และใช้ f_{imp} ด้วยวิธีแมมดานิ โดยสร้างเป็นกฎได้ดังนี้

R_1 : IF X IS A_1 AND Y IS B_1 THEN Z IS C_1

R_2 : IF X IS A_2 AND Y IS B_2 THEN Z IS C_2

โดยที่

A_1, B_1, A_2, B_2 คือ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอินพุต

C_1, C_2 คือ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเอาต์พุต

R_1, R_2 คือ กฎความสัมพันธ์ฟัซซี่ลอจิก

Z คือ ตัวแปรทางภาษาในเอกภพสัมพัทธ์ $U \times V$ และ W ตามลำดับ

α_1, α_2 คือ ระดับความเป็นสมาชิกของ 2 อินพุต (fire strength)

จะได้ค่าความเป็นสมาชิกของผลสรุป (μ_c)

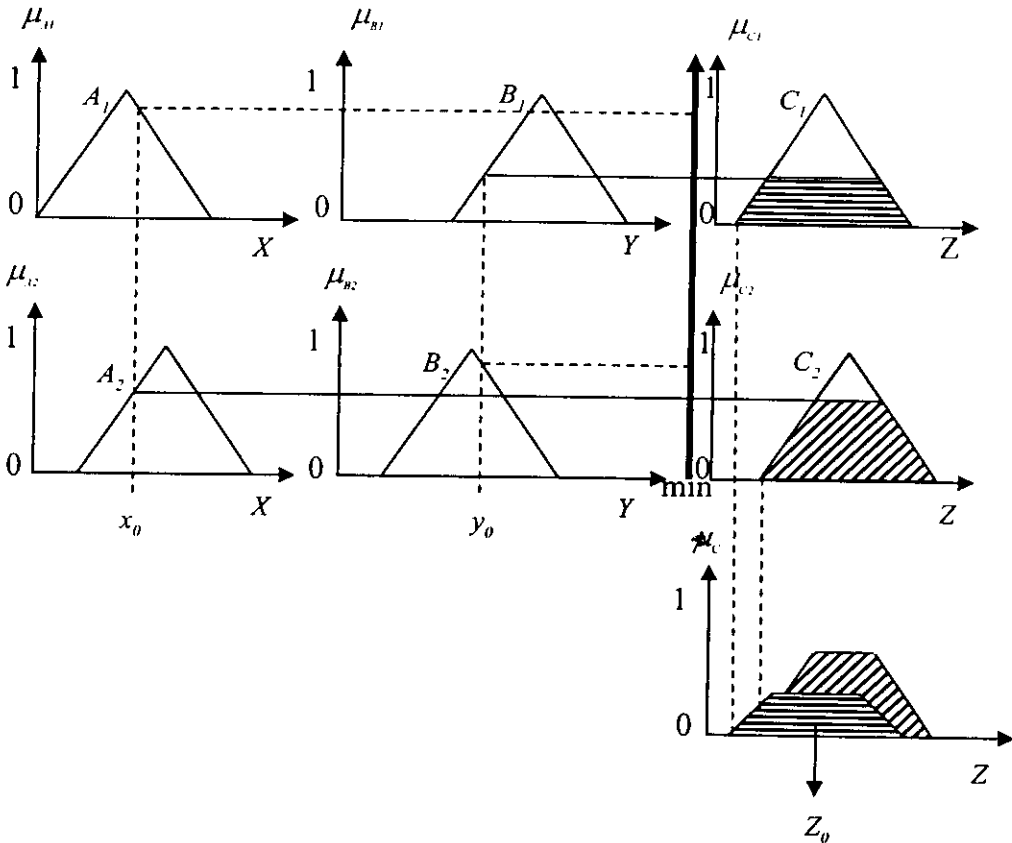
$$\alpha_1 = \min(\mu_{A_1}(x_0), \mu_{B_1}(y_0))$$

$$\alpha_2 = \min(\mu_{A_2}(x_0), \mu_{B_2}(y_0))$$

$$\mu_{c_i}(z) = \min(\alpha_i, \mu_{c_i}(z))$$

$$\mu_c(z) = \max(\mu_{c_1}, \mu_{c_2}) \quad (2.36)$$

จากผลของการหาค่าระดับความเป็นสมาชิกสามารถทำการอนุมานในแบบของแมมดานิได้ดังในภาพประกอบ 2-16



ภาพประกอบ 2-16 การอนุมานโดยวิธีของแมมดานิ

2.6.4 ดีฟัซซิฟิเคชัน

หน่วยดีฟัซซิฟิเคชัน ทำหน้าที่แปลงผลลัพธ์กฎการควบคุมที่อยู่ในรูปตัวแปรฟัซซีที่ลอจิกให้เป็นคริสปีเซต และทำการสเกลกลับมาให้อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์เดิมที่จะเป็นฟัซซิฟิเคชัน วิธีการดีฟัซซิฟิเคชันนั้นมีหลายวิธี แต่ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงวิธีที่นิยมใช้เพียง 2 วิธี ดังนี้

2.6.4.1.1 การเลือกค่าสูงสุด (mean of maximum: MOM) เป็นวิธีการที่ง่ายที่สุดในการ

เลือกข้อมูลเอาต์พุต (Z_0) เป็นการใช้ค่าสูงสุดของค่าระดับการเป็นสมาชิกจากการกระทำหลาย ๆ แบบแล้วเลือกกระทำเพียงหนึ่งรูปแบบ

$$Z_0 = \max_{x \in L'} \mu_A(x) \quad (2.37)$$

ถ้าหากเกิดการกระทำที่มีค่า μ สูงสุดเท่ากันสองค่าจะต้องใช้รูปแบบการแก้ปัญหา อีกลักษณะหนึ่งคือ ใช้ค่าเฉลี่ยของข้อมูลอินพุต

$$Z_0 = \sum_{j=1}^i \frac{V_j}{J} \quad (2.38)$$

เมื่อ V_j คือค่าเอาต์พุตสูงสุดที่มีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากัน

J คือจำนวนเอาต์พุตที่มีค่าความเป็นสมาชิกสูงสุดเท่ากัน

นั่นคือ $V_j = \max \mu_A(x)$

$j = |\{x\}|$ เป็นจำนวนของความเป็นสมาชิก

ตัวอย่างระบบควบคุมฟิชชีลอจิกเพื่อควบคุมการเปิดปิดของลิ้นบังคับน้ำมันเครื่องยนต์ ถ้าผลการกระทำของตัวแปรเอาต์พุตมีค่าความเป็นสมาชิก (μ) ของลิ้นบังคับน้ำมันคือ $\mu_{\text{ห้าม}}$ เท่ากับ 0.75 $\mu_{\text{ปานกลาง}}$ เท่ากับ 0.20 และ $\mu_{\text{ห้าม}}$ เท่ากับ 0.40 ดังนั้น การกระทำของลิ้นบังคับน้ำมันจะใช้ค่า $\mu_{\text{ห้าม}}$ เท่ากับ 0.75 เพราะว่า 0.75 เป็นค่าสูงสุด ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดสำหรับคิฟิชชีเคชัน

2.6.4.2 การเลือกค่าศูนย์กลาง (center of area : COA) เป็นการแบ่งจุดศูนย์กลางของพื้นที่ค่าความเป็นสมาชิกออกเป็นสองส่วนเพื่อหาจุดศูนย์กลางถ่วงของน้ำหนัก ค่าของเอาต์พุตแสดงได้ดังนี้

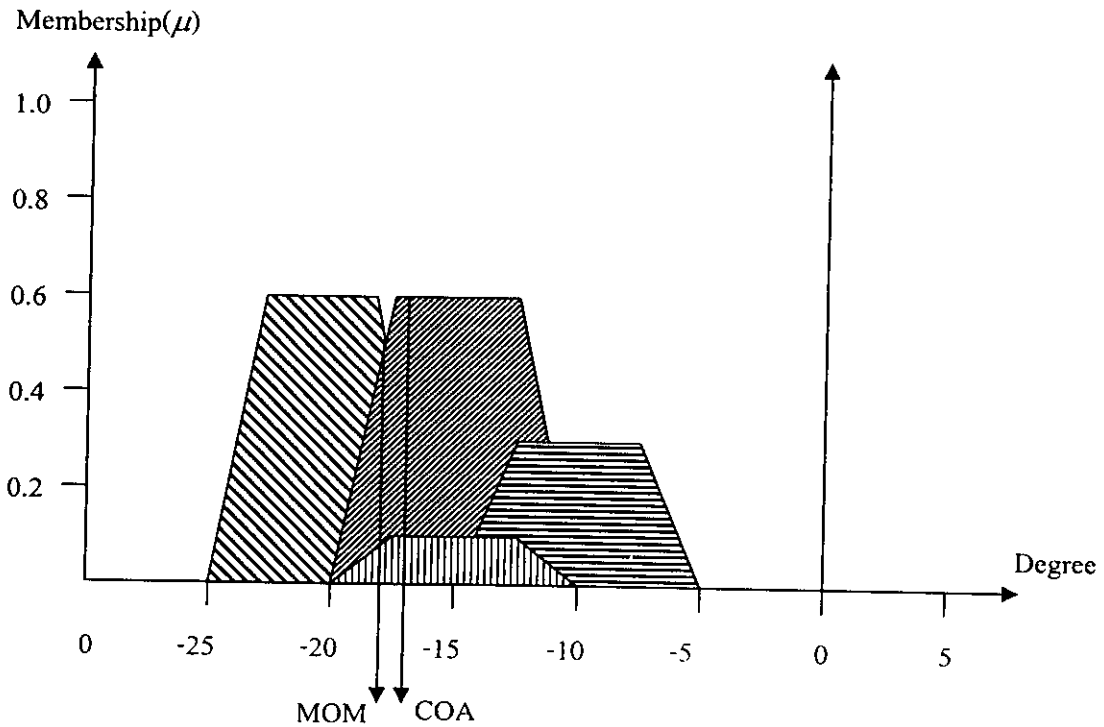
$$Z_0 = \frac{\int v \mu_B(v) dv}{\int \mu_B(v) dv} \quad (2.39)$$

สำหรับเอกภพสัมพัทธ์ที่มีสมาชิกเป็นค่าไม่ต่อเนื่อง (discrete) ที่แบ่งระดับข้อมูลเอาต์พุตออกเป็น m ระดับ แสดงได้ดังสมการ (2.40)

$$Z_0 = \frac{\sum_{k=1}^m v_k \mu_{v(v_k)}}{\sum_{k=1}^m \mu_{v(v_k)}} \quad (2.40)$$

เมื่อ v_k คือ ค่าเอาต์พุตแต่ละส่วน

μ_v คือ ค่าความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตแต่ละส่วน



ภาพประกอบ 2-17 ผลจากการดีฟัซซิฟิเคชันแบบ MOM และ COA

จากภาพประกอบ 2-17 ถ้ากราฟแสดงความเป็นสมาชิกของการเปิดปิดวาล์วน้ำมันสำหรับ หัวฉีด มีค่าแสดงความไม่ต่อเนื่องของฟัซซีเซตเป็นดังนี้

$$\frac{0.6}{-20} + \frac{0.6}{-15} + \frac{0.32}{-10} + \frac{0.1}{-5} + \frac{0}{0}$$

ใช้ MOM ดีฟัซซิฟิเคชัน ด้วยสมการ (2.37)

$$Z_0 = \frac{-20}{1} + \frac{-15}{2}$$

เมื่อ Z_0 คือข้อมูลเอาต์พุตแทนการปรับวาล์ว ดังนั้น จะได้มุมที่ต้องปรับวาล์ว = -17.5 องศา

ใช้ COA ดีฟัซซิฟิเคชันด้วยสมการ (2.39)

$$Z_0 = \frac{[(-20 \times 0.6) + (-15 \times 0.6) + (-10 \times 0.32) + (-15 \times 0.1)]}{(0.6 + 0.6 + 0.32 + 0.1)}$$

จะได้มุมที่ต้องปรับวาล์ว = -15.86 องศา

จากหลักการมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับและทฤษฎีการควบคุมแบบพีซีซีลอจิกที่กล่าวมา จะนำไปสู่การออกแบบตัวควบคุมระบบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งจะได้กล่าวรายละเอียดในบทต่อไป