บทที่ 4

ตรรกแบบฟัซซี่และระบบฟัซซี่

Zadeh [44] ได้นำเสนอหลักการทางคณิตศาสตร์ของฟัซซี่เซตเพื่อใช้อธิบายความคลุมเคลือในการใช้ตรรกทางภาษาและได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบันทั้งในประเทศสหรัฐอเมริกา ยุโรป และ ญี่ปุ่น โดยญี่ปุ่นประสบความสำเร็จอย่างสูงในการประยุกต์หลักการของฟัซซี่มาใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้ระบบควบคุมแบบฟัซซี่ นอกจากนี้ในการประเมินผลการลดต้นทุนของโครงการอวกาศของสหรัฐอเมริกาพบว่าระบบผู้เชี่ยวชาญ (Expert systems) รวมทั้งระบบผู้เชี่ยวชาญแบบฟัซซี่ (Fuzzy expert systems) เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูง

ความแตกต่างของเซตแบบดั้งเดิม (Classical sets หรือ Crisp sets) นั้นอยู่ที่การระบุค่าความเป็นสมาชิก (Degree of membership) ของสมาชิกในเซต โดยทฤษฎีเซตแบบดั้งเดิมนั้นสามารถระบุค่าความเป็นสมาชิกของสมาชิกในเซตได้อย่างแน่ชัด เช่น ถ้ากำหนดเซตของเดือนที่ลงท้ายด้วยคำว่า "-ยน" จะสามารถระบุได้ทันทีว่ามีเดือนไหนบ้างที่เป็นสมาชิกของเซตนี้ นั่นคือ {เมษายน, มิถุนายน, กันยายน, พฤศจิกายน} ซึ่งมีสมาชิกเพียง 4 ตัวเท่านั้น และเดือนอื่น ๆ นอกจากนี้ เช่น มกราคม กุมภาพันธ์ มีนาคม กรกฎาคม เป็นต้น ไม่ใช่สมาชิกของเซตนี้ แต่ในการใช้เหตุผลของมนุษย์นั้นมีการเพิ่มความรู้สึกของผู้ใช้ตรรกเข้าไปด้วย ซึ่งในบางครั้งไม่สามารถแยกแยะความเป็นเซตออกมาได้ เช่น ถ้ากำหนดให้นาย ก มีความสูง 165 เซนติเมตร นาย ข มีความสูง 175 เซนติเมตร และนาย ค มีความสูง 160 เซนติเมตร จะพบว่านาย ก จะเป็นคน "เตี้ย" สำหรับนาย ข แต่นาย ก จะกลายเป็นคน "สูง" สำหรับนาย ค และในทำนองเดียวกันนาย ข จะเป็นคน "สูง" สำหรับนาย ก แต่สำหรับนาย ค นั้น เมื่อนาย ก เป็นคน "สูง" ในความรู้สึกของเขาอาจจะพิจารณานาย ข เป็นคนที่ "สูง" มากกว่านาย ก นั่นหมายความว่า ค่าความเป็นสมาชิกของเซต "สูง" ของทั้งนาย ก และ นาย ข มีความแตกต่างกันโดยเทียบกับนาย ค นั่นเอง

อาศัยหลักการของฟัซซี่ทำให้สามารถประเมินค่าความไม่แน่นอนของผลตอบสนองของระบบต่อตัวแปรทางด้านเข้าใด ๆ ได้ โดยเทียบกับมาตรฐานการประเมินแบบฟัซซี่ ซึ่งปกติจะใช้ระบบฐานข้อมูลที่เรียกว่า (Fuzzy rule-based system) [45-47] เป็นหลัก และในการนำหลักการนี้มาใช้เพื่อแก้ปัญหาทางวิศวกรรมแล้วนั้นจะพบว่าวิธีนี้ถือเป็นการทำให้ระบบที่พิจารณากลายเป็นระบบเชิงเส้นวิธีหนึ่งซึ่งจะกล่าวถึงในรายละเอียดในหัวข้อที่ 4.3

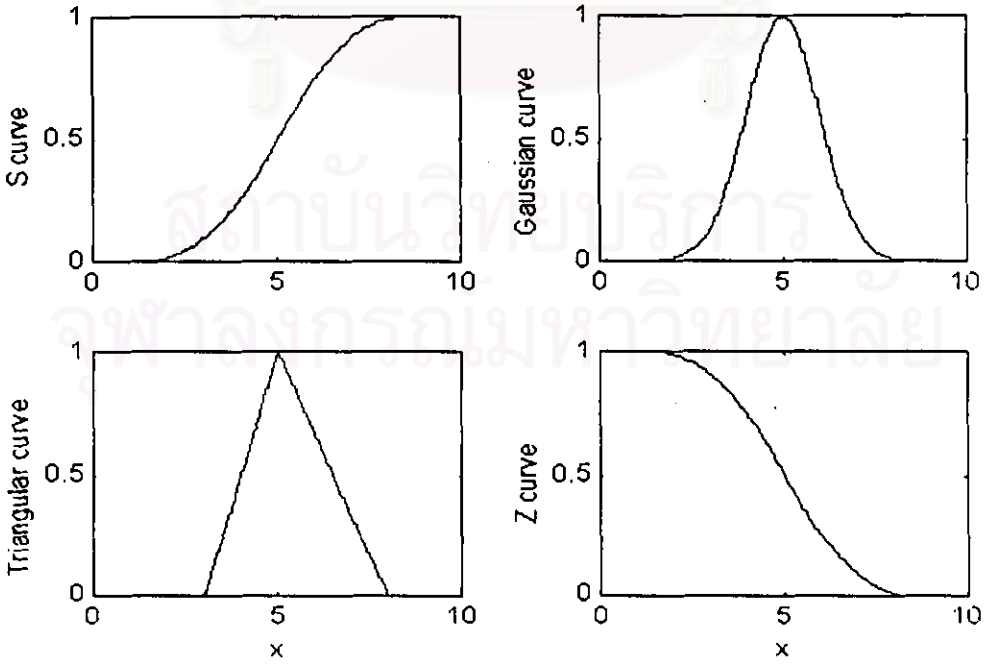
4.1 ทฤษฎีเซตแบบฟัซซี่ (Fuzzy set theory) [44-47]

ในทฤษฎีเซตแบบดั้งเดิมนั้นสามารถระบุค่าความเป็นสมาชิกของสมาชิกในเซตได้อย่างชัดเจน {0,1} หมายความว่า 1 แทนค่าสมาชิกของสมาชิกที่อยู่ในเซต และ 0 แทนค่าสมาชิกของสมาชิกที่ไม่อยู่ในเซต แต่ฟัซซี่เซตนั้นไม่สามารถระบุให้ค่าความเป็นสมาชิกมีค่าเป็น {0,1} แต่จะระบุค่าความเป็นสมาชิกให้เป็นจำนวนจริงที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 และจะต้องมีการกำหนดค่าความเป็นสมาชิกผ่านฟังก์ชันสมาชิก (Membership function) เพื่อระบุค่าความเป็นสมาชิกของเซตของสมาชิกใด ๆ ในเอกภพสัมพัทธ์ (Universe) ดังนี้

กำหนดให้ $A, \widetilde{A}$ เป็นเซตแบบดั้งเดิมและฟัซซี่เซตใด ๆ ตามลำดับ และ $\mu_A(x), \mu_{\widetilde{A}}(x)$ เป็นค่าความเป็นสมาชิกของสมาชิก x ใด ๆ ในเอกภพสัมพัทธ์ U แล้ว ค่าฟังก์ชันสมาชิกของเซตแบบดั้งเดิมและฟัซซี่เซตสามารถนิยามได้ดังนี้

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & ;if\ and\ only\ if\ \ x \in A \\ 0 & ;if\ and\ only\ if\ \ x \notin A \end{cases}$$

ในกรณีของฟัซซี่เซต ค่าฟังก์ชันสมาชิกจะขึ้นอยู่กับประสบการณ์ในการแยกแยะข้อมูลของผู้ศึกษาระบบ ซึ่งไม่มีกฎเกณฑ์ที่ตายตัวในการกำหนดค่าฟังก์ชันสมาชิกนี้ โดยอาจมีรูปร่างลักษณะดังในกราฟที่ 4.1 หรือนอกเหนือจากนี้ก็ได้ ขึ้นอยู่กับความเหมาะสม



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างของฟังก์ชันสมาชิก

การนำเสนอฟัซซี่เซตแตกต่างจากเซตแบบดั้งเดิม คือ ต้องมีการระบุค่าความเป็นสมาชิกของสมาชิกภายในเซตด้วย ดังนั้น ถ้ากำหนดเอกภพสัมพัทธ์แบบไม่ต่อเนื่อง $U = \{x_1, x_2, ..., x_n\}$ และฟัซซี่เซต $\tilde{A}$ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\tilde{A} = \{(x_1, \mu_{\tilde{A}}(x_1)), (x_2, \mu_{\tilde{A}}(x_2)), ..., (x_n, \mu_{\tilde{A}}(x_n))\} \tag{4.1}$$

หรือ

$$\tilde{A} = \frac{\mu_1}{x_1} + \frac{\mu_2}{x_2} + ... + \frac{\mu_n}{x_n} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\mu_i}{x_i} \tag{4.2}$$

เครื่องหมาย + ในสมการที่ 4.2 แสดงถึงตัวดำเนินการ Union และ $\mu_i = \mu_{\tilde{A}}(x_i)$

ในกรณีที่กำหนดเอกภพสัมพัทธ์แบบต่อเนื่อง เช่น ช่วงของจำนวนจริง U ดังนั้นสามารถนำเสนอฟัซซี่เซตในกรณีนี้ได้ดังสมการที่ 4.3

$$\tilde{A} = \int_U \frac{\mu_{\tilde{A}}(x)}{x} \tag{4.3}$$

เครื่องหมาย $\int$ แสดงถึงตัวดำเนินการ Union ของเซต $\tilde{A}$

ทำนองเดียวกันกับเซตแบบดั้งเดิมตัวดำเนินการพื้นฐานทางเซตสามารถนำมาใช้กับฟัซซี่เซตได้เช่นเดียวกัน ดังนี้

1) Intersection ถ้ากำหนดให้ $\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}$ เป็นฟัซซี่เซต และให้ $\tilde{C} = \tilde{A} \cap \tilde{B}$ แทนการดำเนินการ Intersection ซึ่งเหมือนกับการดำเนินการของเซตแบบดั้งเดิมทุกประการ แต่ในกรณีของฟัซซี่เซตต้องมีการกำหนดค่าความเป็นสมาชิกในเซตด้วย ค่าความเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซตที่เกิดจากการดำเนินการ Intersection สามารถนิยามได้ตามสมการที่ 4.4 หรือพิจารณาได้จากรูป 4.2 ข) ดังนี้

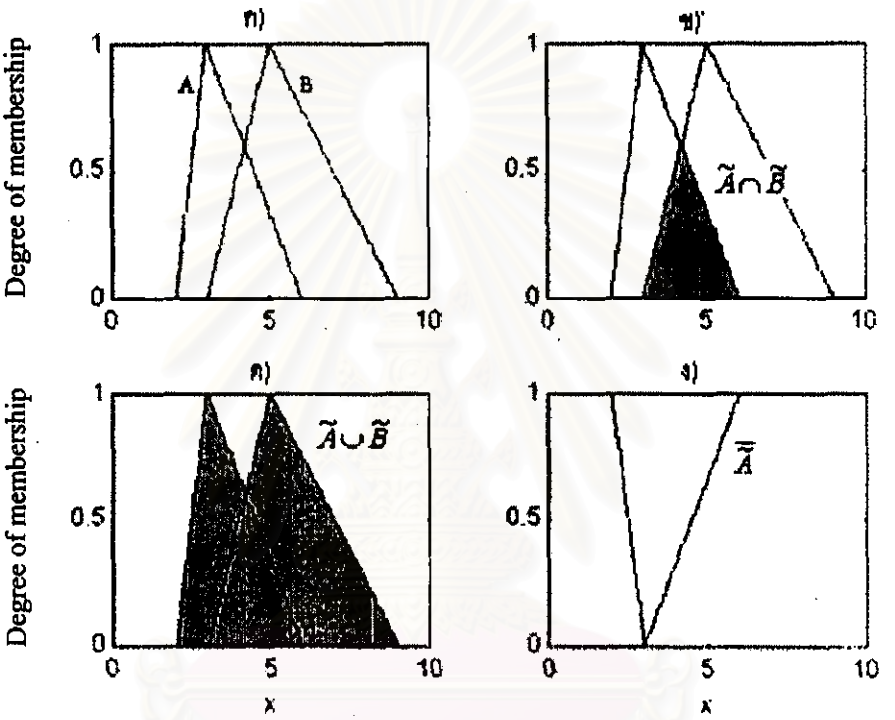
$$\mu_{\tilde{C}}(x) = \mu_{\tilde{A} \cap \tilde{B}}(x) \equiv \mu_{\tilde{A}}(x) \wedge \mu_{\tilde{B}}(x) = \min\left\{\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x)\right\} \tag{4.4}$$

2) Union ถ้ากำหนดให้ $\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}$ เป็นฟัซซี่เซต และให้ $\tilde{C} = \tilde{A} \cup \tilde{B}$ แทนการดำเนินการ Union ซึ่งเหมือนกับการดำเนินการของเซตแบบดั้งเดิมทุกประการ แต่ในกรณีของฟัซซี่เซตต้องมีการกำหนดค่าความเป็นสมาชิกในเซตด้วย ค่าความเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซตที่เกิดจากการดำเนินการ Union สามารถนิยามได้ตามสมการที่ 4.5 หรือพิจารณาได้จากรูป 4.2 ค) ดังนี้

$$\mu_{\tilde{C}}(x) = \mu_{\tilde{A} \cup \tilde{B}}(x) \equiv \mu_{\tilde{A}}(x) \vee \mu_{\tilde{B}}(x) = \max\left\{\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x)\right\} \tag{4.5}$$

3) Complement ถ้ากำหนดให้ $\widetilde{A}, \widetilde{B}$ เป็นฟัซซี่เซต และให้ $\widetilde{B} = \overline{\widetilde{A}}$ แทนการดำเนินการ Complement ซึ่งเหมือนกับการดำเนินการของเซตแบบดั้งเดิมทุกประการ แต่ในกรณีของฟัซซี่เซตต้องมีการกำหนดค่าความเป็นสมาชิกในเซตด้วย ค่าความเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซตที่เกิดจากการดำเนินการ Complement สามารถนิยามได้ตามสมการที่ 4.7 หรือพิจารณาได้จากรูป 4.2 ง) ดังนี้

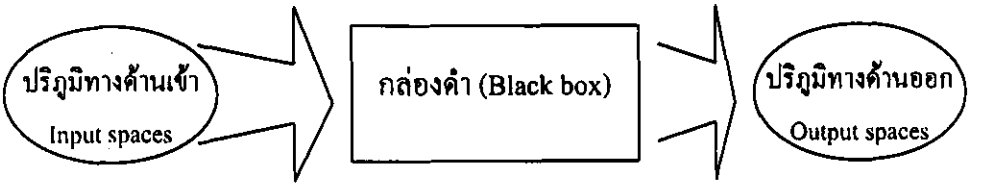
$$\mu_{\widetilde{B}}(x) \equiv \mu_{\overline{\widetilde{A}}}(x) = 1 - \mu_{\widetilde{A}}(x) \tag{4.7}$$



รูปที่ 4.2 การดำเนินการของฟัซซี่เซต

4.2 ตรรกศาสตร์ฟัซซี่ (Fuzzy logic) [45-47]

ตรรกศาสตร์ฟัซซี่เป็นกระบวนการที่สะดวกในการถ่ายโอนค่าตัวแปรทางด้านเข้าไปสู่ตัวแปรทางด้านออก ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ระหว่างปริภูมิทางด้านเข้าและปริภูมิทางด้านออกจะมีกล่องดำ (Black box) คั่นอยู่ มีกระบวนการที่นำมาใส่ในกล่องดำหลายกระบวนการ เช่น ระบบฟัซซี่ (Fuzzy system) ระบบเชิงเส้น (Linear system) ระบบผู้เชี่ยวชาญ (Expert system) โครงข่ายประสาท (Neural network) สมการเชิงอนุพันธ์ (Differential equation) เป็นต้น ฟัซซี่ถือเป็นวิธีการที่ดีที่สุดในการถ่ายโอนค่าของตัวแปรดังกล่าว ถึงแม้ว่าจะสามารถใช้กระบวนการอื่นในการจำลองผลแต่ฟัซซี่มีความเร็วและง่ายในการคำนวณ



รูปที่ 4.3 การถ่ายโอนค่าตัวแปรทางด้านเข้าไปสู่ตัวแปรทางด้านออก

การกำหนดค่าความจริงให้กับนิพจน์ทางตรรกศาสตร์ฟัซซี่นั้นมีสมมติฐานมาจากหลักการที่ว่าไม่มีนิพจน์ใดที่มีค่าความจริงเป็นจริงอย่างแน่นอนหรือเป็นเท็จโดยสมบูรณ์ ดังนั้นการกำหนดค่าความจริงสามารถกำหนดได้ด้วยจำนวนจริงระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งแทนค่าความจริงที่เป็นเท็จอย่างแท้จริงที่ค่า 0 และเพิ่มค่าความจริงไปจนกระทั่งเป็นจริงโดยสมบูรณ์ที่ค่า 1 และการนำนิพจน์ทางตรรกศาสตร์ฟัซซี่มาเชื่อมต่อกันด้วยตัวเชื่อมทางตรรกนั้นยังคงอาศัยหลักการที่คล้ายกับตรรกศาสตร์บูลลีนแต่ครอบคลุมมากกว่า ดังแสดงในตารางที่ 4.1.1 ถึง 4.1.3 และ 4.2.1 ถึง 4.2.3

ตารางที่ 4.1.1 AND

A	B	$A \wedge B$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

ตารางที่ 4.1.2 OR

A	B	$A \vee B$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

ตารางที่ 4.1.3 NOT

A	$\sim A$
0	1
1	0

ตารางที่ 4.1 การดำเนินการทางตรรกศาสตร์บูลลีน

ตารางที่ 4.2.1 AND

A	B	min(A,B)
0.1	0.6	0.1
0.6	0.3	0.3
1.0	0.4	0.4
0.6	0.6	0.6

ตารางที่ 4.2.2 OR

A	B	max(A,B)
0.1	0.6	0.6
0.6	0.3	0.6
1.0	0.4	1.0
0.6	0.6	0.6

ตารางที่ 4.2.3 NOT

A	1 - A
0.8	0.2
0.3	0.7

ตารางที่ 4.2 การดำเนินการทางตรรกศาสตร์ฟัซซี่

ฟัซซี่เซตและการดำเนินการทางตรรกศาสตร์ฟัซซี่คือประธานและกิริยาของตรรกศาสตร์ฟัซซี่ตามลำดับ แต่การใช้เหตุผลของมนุษย์นั้นต้องอาศัยการนำเสนอในรูปของประโยคที่สมบูรณ์เป็นประโยคเงื่อนไข (Conditional statements) ในรูปของกฎ ถ้า...แล้ว... (If-then rules) ซึ่งได้นำมาใช้เสนอการอ้างเหตุผลให้สมบูรณ์ ดังนี้

IF x is A THEN y is B (4.8)

โดยที่ A และ B แทนปริมาณทางภาษาโดยใช้ฟัซซี่เซตที่นิยามบนช่วง X ($x \in X$) และ Y ($y \in Y$) ตามลำดับ ตัวอย่างเช่น ในการฟังเพลงจากวิทยุ ถ้าผู้ฟังรู้สึกว่าเสียงที่ได้ยินนั้นเบาเกินไปแล้ว ผู้ฟังจะทำการเพิ่มระดับเสียงของวิทยุโดยอัตโนมัติ แต่การเพิ่มระดับเสียงนั้นผู้ฟังไม่จำเป็นต้องตัดสินใจอย่างละเอียดว่า ควรจะเพิ่มระดับเสียงเป็นระดับที่เท่าใด รู้เพียงเมื่อเพิ่มระดับเสียงไปแล้ว ความดังของเสียงเป็นที่พอใจของผู้ฟังก็จะหยุดการปรับ ดังตัวอย่างการอ้างเหตุผลต่อไปนี้

IF Sound is LOW THEN Volume is positive

กฎในลักษณะนี้จะเรียกว่า Fuzzy IF-THEN Rules ซึ่งจะมีไวยากรณ์ทางภาษาเป็นไปตามสมการที่ 4.9

IF <fuzzy proposition>, THEN <fuzzy proposition> (4.9)

ในส่วนของ Fuzzy propositions นั้นมี 2 ประเภท คือ

1) Atomic fuzzy propositions ถ้ากำหนดให้ S, M และ F เป็นฟัซซี่เซตใด ๆ แล้ว atomic fuzzy propositions จะประกอบด้วยประโยคเพียงหนึ่งประโยคเท่านั้น ดังตัวอย่างต่อไปนี้

   x is S

   x is M

   x is F

2) Compound fuzzy propositions ถ้ากำหนดให้ S, M และ F เป็นฟัซซี่เซตใด ๆ แล้ว compound fuzzy propositions จะประกอบด้วยประโยคมากกว่าหนึ่งประโยคมาเชื่อมกันด้วยตัวเชื่อมแบบต่าง ๆ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

x is S or x is not M

x is not S and x is not F

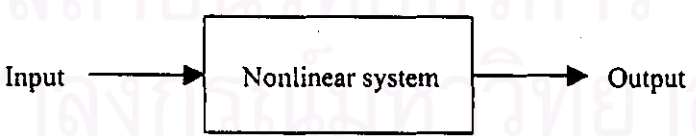
(x is S and x is not F) or x is M

ตรรกศาสตร์เป็นการศึกษากระบวนการและหลักการใช้เหตุผล หมายถึง การได้มาซึ่งความรู้ใหม่ จากความรู้เดิมหรือประสบการณ์ที่มีอยู่ โดยตรรกศาสตร์แบบดั้งเดิมนั้นแบ่งนิพจน์ออกเป็น 2 ลักษณะ คือ จริง มีค่าความจริงเป็น 1 และ เท็จ มีค่าความจริงเป็น 0 เท่านั้น แต่ตรรกศาสตร์ฟัซซี่นั้น มีการพิจารณาค่าความจริงระหว่าง 0 ถึง 1 ดังนั้น การพิจารณาหาค่าความจริงของการใช้เหตุผลแบบฟัซซี่นี้ จึงต้องอาศัยการประมาณค่าความจริงโดยใช้วิธีการต่าง ๆ (Approximate reasoning) ดังจะได้นำเสนอต่อหัวข้อถัดไป

4.3 Fuzzy rule-based systems (FRBS) [45-48]

การใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการแก้ปัญหานั้น มีหลายวิธีในการนำเสนอความรู้ แต่วิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุด คือ การนำเสนอความรู้ของมนุษย์ในรูปแบบของภาษา ตามสมการที่ 4.9 ในการศึกษาการทำงานของระบบใด ๆ นั้น พบว่าระบบจะมีพฤติกรรมตอบสนองได้หลายรูปแบบต่อสัญญาณทางด้านเข้าที่แตกต่างกัน ดังนั้น ความรู้หรือกฎที่ได้จากการศึกษาระบบจึงมีได้มากมาย รวมกันเป็น Rule-based systems และเมื่อกฎมีมากกว่าหนึ่งกฎ ทำให้อาจจะต้องมีการรวมกฎเข้าด้วยกันผ่านตัวเชื่อมต่าง ๆ ได้

ในการจำลองผลระบบไม่เป็นเชิงเส้นโดยใช้ FRBS ประกอบด้วย เซตของกฎทางฟัซซี่ที่อธิบายพฤติกรรมทางกายภาพของระบบในลักษณะต่าง ๆ เซตของตัวแปรทางด้านเข้า และเซตของตัวแปรทางด้านออกที่ได้จากระบบ พิจารณาระบบตัวอย่างดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ระบบตัวอย่าง

ถ้ากำหนดให้ระบบตัวอย่างนี้มีจำนวนตัวแปรทางด้านเข้า n ตัว ตัวแปรทางด้านออก m ตัว และจำนวนกฎมีค่าเป็น r กฎ แล้ว ในการสร้างแบบจำลองของระบบไม่เป็นเชิงเส้นนั้น จะแบ่ง FRBS ออกเป็น 5 ประเภทดังนี้

1) Rule-based จะอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางด้านเข้ากับตัวแปรทางด้านออกแบบค่าเดียว (Singletons) วิธีนี้จะคล้ายกับการเปิดตารางเพื่อค้นหาค่าที่สอดคล้อง (Look up table) ดังนี้

$$\text{IF} \quad A^i : x = x_i \quad \text{THEN} \quad B^i : y = y_i \quad ; i = 1,2,\ldots,r$$

2) Rule-based จะอยู่ในรูปที่ตัวแปรทางด้านเข้าเป็นตัวแปรค่าจริงที่แบ่งเป็นช่วง ส่วนตัวแปรทางด้านออกจะมีเพียงค่าเดียว (Singletons) ดังนี้

$$\text{IF} \quad A^i : x_{i-1} < x < x_i \quad \text{THEN} \quad B^i : y = y_i \quad ; i = 1,2,\ldots,r$$

ในบางครั้งค่าของตัวแปรทางด้านออกอาจแปรค่าได้ตามตัวแปรทางด้านเข้า ซึ่งจะอยู่ในรูปของฟังก์ชันของตัวแปรทางด้านเข้า ดังนี้

$$\text{IF} \quad A^i : x_{i-1} < x < x_i \quad \text{THEN} \quad B^i : y = f_i(x) \quad ; i = 1,2,\ldots,r$$

3) Rule-based จะอยู่ในรูปที่ตัวแปรทางด้านเข้าเป็นตัวแปรค่าจริงที่แบ่งเป็นช่วง ส่วนตัวแปรทางด้านออกจะอยู่ในรูปของฟัซซี่เซตหรือความสัมพันธ์แบบฟัซซี่ใด ๆ ดังนี้

$$\text{IF} \quad A^i : x_{i-1} < x < x_i \quad \text{THEN} \quad y = B^i \quad ; i = 1,2,\ldots,r \text{ หรือ}$$
$$\text{IF} \quad A^i : x_{i-1} < x < x_i \quad \text{THEN} \quad y = R^i \quad ; i = 1,2,\ldots,r$$

เมื่อ Bi คือ ฟัซซี่เซต ส่วน Ri คือ ความสัมพันธ์ของฟัซซี่เซตซึ่งได้จากกระบวนการ Defuzzification โดยจะกล่าวถึงต่อไปในหัวข้อที่ 4.3.4

4) Rule-based จะอยู่ในรูปที่ตัวแปรทางด้านเข้าเป็นฟัซซี่เซต ส่วนตัวแปรทางด้านออกจะอยู่ในรูปของฟังก์ชันค่าจริงหรือค่าคงที่ใด ๆ ดังนี้

$$\text{IF} \quad x = A^i \quad \text{THEN} \quad B^i : y = y_i \quad ; i = 1,2,\ldots,r$$
$$\text{IF} \quad x = A^i \quad \text{THEN} \quad B^i : y = f_i(x) \quad ; i = 1,2,\ldots,r$$

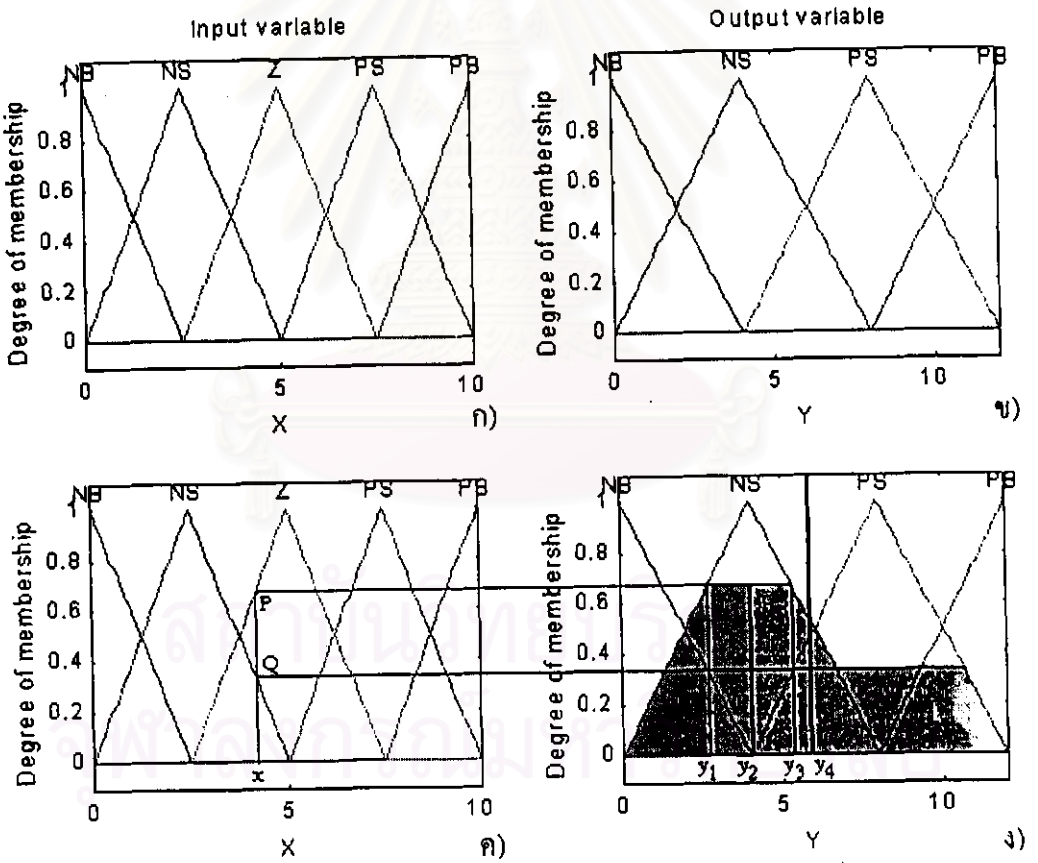
5) Rule-based จะอยู่ในรูปที่ตัวแปรทางด้านเข้าเป็นฟัซซี่เซต ส่วนตัวแปรทางด้านออกจะอยู่ในรูปของฟัซซี่เซตหรือความสัมพันธ์แบบฟัซซี่ใด ๆ ดังนี้

IF $x = A^i$ THEN $y = B^i$; $i = 1,2,\ldots,r$ หรือ

IF $x = A^i$ THEN $y = R^i$; $i = 1,2,\ldots,r$

4.3.1 ระบบฟัซซี่ (Fuzzy systems) [45-47]

เป็นกระบวนการส่งผ่านค่าจาก Input space ไปยัง Output space อย่างง่าย ๆ โดยการพิจารณาค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องให้เป็นปริมาณในเชิงคุณภาพ เช่น ถ้ากำหนด X เป็นตัวแปรค่าจริงแบบฟัซซี่ ตัวแปรแบบนี้ไม่สามารถระบุการเป็นสมาชิกของเซตให้แน่ชัดได้ ดังนั้น สมาชิกในฟัซซี่เซตจำเป็นต้องมีค่าความเป็นสมาชิกเพิ่มเข้ามาด้วย แต่ความเป็นสมาชิกของค่าตัวแปรนั้นจะมีค่าระหว่าง 0-1 โดยใช้ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกเป็นตัวกำหนด ซึ่งฟังก์ชันนี้ขึ้นอยู่กับประสบการณ์และข้อมูลของผู้กำหนด ถ้ากำหนดฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรทางด้านเข้าเป็นดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางด้านเข้ากับตัวแปรทางด้านออก

จากรูปที่ 4.5 ก) แสดงตัวแปรทางด้านเข้า X ที่แบ่งได้ 5 ระดับ คือ NB, NS, Z, PS และ PB รูปที่ 4.5 ข) แสดงตัวแปรทางด้านออก Y ที่แบ่งได้ 4 ระดับ คือ NB, NS, PS และ PB การใช้ตรรกแบบฟัซซี่นี้ ไม่ต้องการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใด ๆ ของระบบ แต่ใช้การเขียนกฎความ

สัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางด้านเข้ากับตัวแปรทางด้านออก ซึ่งกฎนี้ได้มาจากประสบการณ์หรือข้อมูลที่มีอยู่ เช่น ถ้ากำหนดกฎตัวอย่างของระบบนี้เป็นดังนี้

IF	X = 'NS'	THEN	Y = 'PS'
IF	X = 'Z'	THEN	Y = 'NS'
	.....		.....

ถ้าพิจารณาค่าตัวแปรทางด้านเข้า X = x ดังในรูปที่ 4.5 ค) พบว่าเมื่อลากเส้นตั้งฉากขึ้นไปจะไปตัดกับกราฟ 'NS' กับ 'Z' ที่จุด Q และ P ตามลำดับ จากกฎที่เขียนไว้ ตัวแปรทางด้านเข้าที่เป็น 'NS' สอดคล้องกับตัวแปรทางด้านออกที่เป็น 'PS' และ ตัวแปรทางด้านเข้าที่เป็น 'Z' สอดคล้องกับตัวแปรทางด้านออกที่เป็น 'NS' ดังนั้น ต้องฉายเส้นจากจุด Q ไปยังระนาบตัวแปรทางด้านออกให้ตัดกราฟ 'PS' จะได้รูปสี่เหลี่ยมคางหมูรูปหนึ่ง ทำนองเดียวกัน จากจุด P ลากไปตัดกราฟ 'NS' ในระนาบตัวแปรทางด้านออก ได้รูปสี่เหลี่ยมคางหมูอีกหนึ่งรูปเช่นเดียวกัน แต่รูปจะมีขนาดใหญ่กว่ารูปแรก จากนั้นจึงทำการรวมรูปทั้งสองเข้าด้วยกันจะได้รูปที่แรเงาดังรูปที่ 4.5 ง)

ขั้นต่อไปเป็นการแปลงค่าตัวแปรทางด้านออกที่ได้ให้เป็นค่าจริง(Defuzzification) ซึ่งมีด้วยกัน 4 วิธีที่ใช้กันแพร่หลาย Centroid, Smallest of maximum, Middle of maximum และ Largest of maximum

จุดที่แสดงในกราฟ y_1, y_2, y_3 และ y_4 เป็นค่าที่ได้จากการทำ Defuzzification ทั้ง 4 วิธีที่กล่าวข้างต้น

1. Centroid เป็นการหาจุดศูนย์ถ่วงของรูปที่แรเงา ซึ่งค่าที่ได้จะถือเป็นค่าตัวแปรทางด้านออกที่สอดคล้องกับตัวแปรทางด้านเข้าที่กำหนด จากรูป X = x -> Y = y_4
2. Smallest of maximum ถ้าจุดสูงสุดของส่วนที่แรเงามีหลายจุด ค่าที่เหมาะสมจะใช้ค่าที่ต่ำที่สุด อาจเรียกสั้น ๆ ว่า Min of max. จากรูป X = x -> Y = y_1
3. Middle of maximum ถ้าจุดสูงสุดของส่วนที่แรเงามีหลายจุด ค่าที่เหมาะสมจะใช้ค่าเฉลี่ยของค่าทั้งหมด จากรูป X = x -> Y = y_2
4. Largest of maximum ถ้าจุดสูงสุดของส่วนที่แรเงามีหลายจุด ค่าที่เหมาะสมจะใช้ค่าที่สูงที่สุด อาจเรียกสั้น ๆ ว่า Max of max. จากรูป X = x -> Y = y_3

ดังนั้น ฟัซซี่เซตจึงเป็นเซตที่ไม่ได้ระบุค่าความเป็นสมาชิกอย่างชัดเจน แต่จะระบุด้วยค่าความเป็นสมาชิกของตัวเอง นอกจากนี้ การสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางด้านเข้าและตัวแปรทางด้านออกนั้นเราไม่ต้องการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ หากเพียงแต่ต้องการคณิตศาสตร์อย่างง่ายในการสร้างฟังก์ชันการเป็นสมาชิกเท่านั้น และใช้ประสบการณ์ที่มีอยู่ในการ

สร้างกฎเพื่อระบุความสัมพันธ์ของตัวแปร เป็นวิธีที่ง่าย สะดวกในการวิเคราะห์ มีความรวดเร็วในการคำนวณ

4.3.2 การสร้างกฎทางฟัซซี่จากข้อมูลเชิงตัวเลข (Generating fuzzy rules from numerical data) [48-52]

จากกระบวนการสร้างฐานข้อมูล จะได้ชุดข้อมูลมาจำนวนหนึ่ง การใช้ตรรกแบบฟัซซี่ตัดสินค่าตัวแปรทางด้านออกที่เหมาะสมนั้นต้องทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางด้านเข้ากับตัวแปรทางด้านออก ถ้าระบบที่สนใจเป็นระบบที่ได้มีการศึกษามาเป็นเวลานาน ผู้ศึกษาระบบสามารถพิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรทางด้านเข้ากับตัวแปรทางด้านออกโดยเขียนเป็นกฎทางฟัซซี่(If-then rules) อย่างง่าย ๆ ได้ แต่ระบบที่ออกแบบใหม่หรือเพิ่งเริ่มต้นศึกษานั้น การพิจารณากฎทางฟัซซี่ยังไม่สามารถทำได้ ต้องรอประสบการณ์จากการทำงานของระบบเพื่อให้ทราบคุณลักษณะของระบบ ในกรณีเช่นนี้ การรอผลการทำงานของระบบจริงบางครั้งอาจไม่สะดวกที่จะเลือกจุดทำงานของระบบในสภาวะเริ่มต้นหรือไม่สามารถรอให้ระบบทดลองทำงานจริงได้ ดังนั้นการจำลองผลของระบบเพื่อเก็บข้อมูลมาใช้สร้างเป็นฐานข้อมูลจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสม เมื่อมีข้อมูลของระบบจำนวนหนึ่ง ขั้นตอนต่อไปคือการสร้างกฎทางฟัซซี่จากข้อมูลเหล่านี้เพื่อนำมาใช้อนุมานคำตอบ ถ้ากำหนดระบบที่มีตัวแปรทางด้านเข้า 1 ตัว และตัวแปรทางด้านออก 1 ตัว มีชุดข้อมูล n ชุด ดังนี้

$\{(X^{(1)},Y^{(1)}), (X^{(2)},Y^{(2)}),\ldots, (X^{(n)},Y^{(n)})\}$

โดยที่ X เป็นตัวแปรทางด้านเข้า และ Y เป็นตัวแปรทางด้านออก การสร้างกฎทางฟัซซี่อย่างง่ายจากชุดข้อมูลที่มีอยู่นี้ สามารถทำได้ดังนี้

1. แบ่งตัวแปรทางด้านเข้าและตัวแปรทางด้านออกเป็นช่วงข้อมูล(Fuzzy variables) โดยพิจารณาให้ครอบคลุมตลอดช่วงข้อมูลทั้งหมด การแบ่งช่วงข้อมูลของแต่ละตัวแปรให้แบ่งเป็น 2M+1 ช่วง M=0,1,2,... โดยตัวแปรแต่ละตัวไม่จำเป็นต้องแบ่งให้มีจำนวนช่วงเท่ากัน จากนั้นทำการเลือกฟังก์ชันการเป็นสมาชิกให้กับตัวแปรทั้งหมด

2. สร้างกฎทางฟัซซี่จากชุดข้อมูล 1 กฎ ต่อ 1 ชุด ตัวอย่างเช่น รูปที่ 4.5 ถ้ากำหนดชุดข้อมูลเป็น $(X^{(k)},Y^{(k)})$ โดยค่า $X^{(k)}$ ในรูปที่ 4.5 ค) อยู่ในช่วง NS และ Z อ่านค่าสมาชิกจากรูปได้เท่ากับ 0.32 และ 0.68 ตามลำดับ $Y^{(k)}$ อยู่ในช่วง NS และ PS ให้ค่าการเป็นสมาชิกเท่ากับ 0.8 และ 0.2 ตามลำดับ จากนั้นทำการเลือกช่วงของตัวแปรที่ให้ค่าการเป็นสมาชิกสูงที่สุด(Highest match method)ของแต่ละตัวแปรมาสร้างเป็นกฎ ดังนี้

$(X^{(k)},Y^{(k)})$ => [$X^{(k)}$(0.68 ในช่วง Z),Y(k)(0.8 ในช่วง NS)] => กฎข้อที่ k

IF X is Z THEN Y is NS

จากข้อมูล n ชุด จะสามารถสร้างกฎได้ n กฎ

3. ถ้ามีชุดข้อมูลอยู่เป็นจำนวนมากและข้อมูลแต่ละชุดสร้างเป็นกฎได้ 1 กฎแล้ว โอกาสที่จะสร้างกฎที่มีส่วนของ IF ซ้ำกันจึงมีความน่าเป็นสูง และถ้าส่วนของ THEN มีความแตกต่างกันจะทำให้เกิดปัญหาในการอนุมานคำตอบ ดังนั้นจึงต้องมีการสร้างดัชนีเพื่อใช้เป็นตัววัดความสำคัญของกฎ(Degree of rule, DOR) โดยมีหลักการดังนี้

ถ้ากำหนดกฎทางฟัซซี่เป็น IF X_1 = A and X_2 = B THEN Y = C

$$D(Rule) = m_A(X_1)\, m_B(X_2)\, m_C(Y) \tag{4.10}$$

โดย $m_H(X_i)$ เป็นค่าการเป็นสมาชิกของตัวแปร X_i ในช่วง H และจะทำการเลือกกฎที่มีส่วนของ IF- ซ้ำกันให้เหลือเพียงกฎเดียวคือกฎที่ให้ค่า DOR สูงสุดเท่านั้น ทำให้จำนวนกฎที่จะใช้ในการอนุมานมีจำนวนลดลง

4. การอนุมานคำตอบจากกฎที่สร้างขึ้นในขั้นตอนที่ 3 นี้ จะใช้การหาค่า Centroid เหมือนกับการทำ Defuzzification ถ้าตัวแปรทางด้านเข้าที่ต้องการอนุมานมีค่าเป็น $(X_1^{(p)}, X_2^{(p)})$ และกำหนดให้ O^i เป็นช่วงของตัวแปรทางด้านออกของกฎที่ i และ I_u^i เป็นช่วงของตัวแปรทางด้านเข้าตัวที่ u ของกฎที่ i ผลของกฎที่ i ต่อตัวแปรทางด้านเข้าชุดนี้สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$m_{O^i}^i = m_{I_1^i}(X_1^{(p)}) m_{I_2^i}(X_2^{(p)}) \tag{4.11}$$

และเมื่อรวมผลของกฎทั้งหมด จึงสามารถอนุมานคำตอบได้ตามสมการต่อไปนี้

$$y = \frac{\sum_{i=1}^{K} m_{O^i}^i \bar{y}^i}{\sum_{i=1}^{K} m_{O^i}^i} \tag{4.12}$$

จะพบว่าสมการที่ (4.12) เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง 2 ตัวแปรทางด้านเข้ากับ 1 ตัวแปรทางด้านออก เท่านั้น เมื่อจำนวนตัวแปรทั้งตัวแปรทางด้านเข้าและตัวแปรทางด้านออกเปลี่ยนแปลงไป สมการที่ (4.11)และ(4.12) สามารถปรับปรุงให้ใช้ได้กับจำนวนตัวแปรขนาดใด ๆ ได้ดังนี้

$$m^i = \prod_{v=1}^{v=I^i} m_v^i(X_v) \tag{4.13}$$

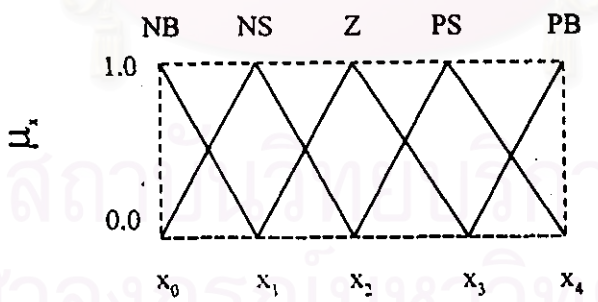
$$y_j = \frac{\sum_{i=1}^{K} m_{O_j^i}^i \bar{y}_j^i}{\sum_{i=1}^{K} m_{O_j^i}^i}; \qquad j = 1,2,\ldots, J \tag{4.14}$$

เมื่อระบบมีจำนวนตัวแปรทางด้านเข้าเท่ากับ V และจำนวนตัวแปรทางด้านออกเท่ากับ J การนำเสนอสูตรการคำนวณค่าเฉลี่ยเพื่อใช้อนุมานค่าตัวแปรทางด้านออกตามที่กล่าวมานั้น เป็นวิธีการทำ Defuzzification วิธีหนึ่ง อาจใช้กระบวนการทำ Defuzzification วิธีการอื่นตามที่ได้เสนอในข้อ 4.3.1 ได้ตามความเหมาะสม

4.3.3 ฟังก์ชันสมาชิก (Membership functions)

การกำหนดฟังก์ชันสมาชิกให้เหมาะสมนั้นจะทำให้การอนุมานผลตอบของระบบฟัซซี่มีประสิทธิภาพสูง และรูปแบบของฟังก์ชันสมาชิกที่ยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ ฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 4.5 เนื่องจากฟังก์ชันนี้มีความชัดเจนในการให้จุดสูงสุดเพียงจุดเดียว และจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของการใช้ฟังก์ชันสมาชิกพบว่า ฟังก์ชันสมาชิกรูปสามเหลี่ยมนี้สามารถช่วยลดระดับของสัญญาณรบกวน (Noise) ที่ตัวแปรทางด้านเข้าได้ และถ้าปรับรูปสามเหลี่ยมให้เหมาะสมจะทำให้สามารถกำจัดผลของสัญญาณรบกวนต่อตัวแปรทางด้านเข้าได้

ฟังก์ชันสมาชิกที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะใช้รูปสามเหลี่ยมและแบ่งค่าตัวแปรออกเป็นฟัซซี่เซต 5 เซต คือ NB, NS, Z, PS และ PB ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 Fuzzy partitions ของตัวแปร x

เนื่องจากการแบ่งฟัซซี่เซต (Fuzzy partitions) ในที่นี้แบ่งออกเป็น 4 ช่วงเท่า ๆ กันคือ $[x_0,x_1]$, $[x_1,x_2]$, $[x_2,x_3]$, และ $[x_3,x_4]$ ค่า x ใด ๆ ในแต่ละช่วงจะเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซตสองเซตพร้อมกัน ดังนี้

1) $x \in [x_0, x_1] \Rightarrow (\tilde{x} \in NB) \wedge (\tilde{x} \in NS)$

2) $x \in [x_1, x_2] \Rightarrow (\tilde{x} \in NS) \wedge (\tilde{x} \in Z)$

3) $x \in [x_2, x_3] \Rightarrow (\tilde{x} \in Z) \wedge (\tilde{x} \in PS)$

4) $x \in [x_3, x_4] \Rightarrow (\tilde{x} \in PS) \wedge (\tilde{x} \in PB)$

การกำหนดตัวแปรทางด้านเข้านั้น โดยทั่วไปจะอยู่ภายในขอบเขตของค่าสูงสุดและต่ำสุด นั่นคือ $x \in [x_{min}, x_{max}]$ ในการคำนวณค่าสมาชิกของตัวแปร x ใด ๆ ที่อยู่ในช่วงทั้ง 4 ช่วง สามารถคำนวณได้ โดยกำหนดให้

$$x_0 = x_{min} \; ; \; x_4 = x_{max}$$

$$x_1 = x_{min} + \frac{x_{max} - x_{min}}{4}$$

$$x_2 = x_{min} + \frac{x_{max} - x_{min}}{2}$$

$$x_3 = x_{min} + \frac{3}{4}(x_{max} - x_{min})$$

ค่าความเป็นสมาชิกสามารถคำนวณได้ดังนี้

1) $x \in [x_0, x_1] \Rightarrow x \in NB \Rightarrow \mu x = 1 - \frac{4(x - x_{min})}{(x_{max} - x_{min})}$

$$\Rightarrow x \in NS \Rightarrow \mu x = \frac{4(x - x_{min})}{(x_{max} - x_{min})}$$

2) $x \in [x_1, x_2] \Rightarrow x \in NS \Rightarrow \mu x = 1 - \frac{4(x - x_1)}{(x_{max} - x_{min})}$

$$\Rightarrow x \in Z \Rightarrow \mu x = \frac{4(x - x_1)}{(x_{max} - x_{min})}$$

3) $x \in [x_2, x_3] \Rightarrow x \in Z \Rightarrow \mu x = 1 - \frac{4(x - x_2)}{(x_{max} - x_{min})}$

$$\Rightarrow x \in PS \Rightarrow \mu x = \frac{4(x - x_2)}{(x_{max} - x_{min})}$$

$$4)\ x \in [x_3, x_4] \quad \Rightarrow x \in PS \quad \Rightarrow \mu x = 1 - \frac{4(x - x_3)}{(x_{max} - x_{min})}$$

$$\Rightarrow x \in PB \quad \Rightarrow \mu x = \frac{4(x - x_3)}{(x_{max} - x_{min})}$$

ตัวอย่าง เช่น กำหนดให้ $x \in [0,10]$ จากชุดสมการข้างต้นจะได้ $x_{min} = 0$, $x_1 = 2.5$, $x_2 = 5.0$, $x_3 = 7.5$ $x_{max} = 10.0$

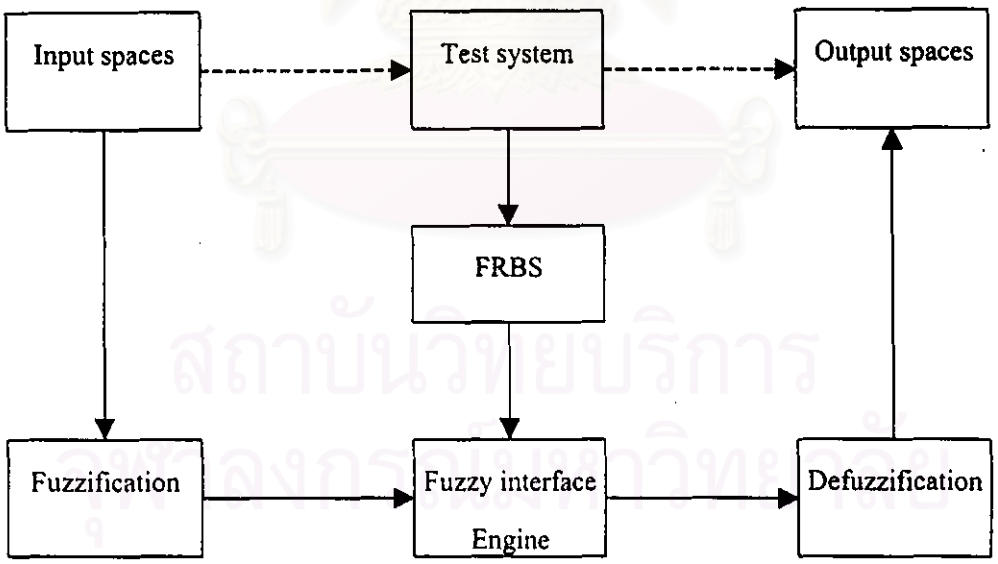
ถ้า $x = 4.5$ แล้ว $x \in NS$ ด้วยค่าสมาชิก 0.2 และ $x \in Z$ ด้วยค่าสมาชิก 0.8

ถ้า $x = 6.0$ แล้ว $x \in Z$ ด้วยค่าสมาชิก 0.6 และ $x \in PS$ ด้วยค่าสมาชิก 0.4

การคำนวณค่าสมาชิกในลักษณะนี้จะช่วยให้การคำนวณหากฎทางฟัซซี่จากฐานข้อมูลเชิงตัวเลขที่นำเสนอในหัวข้อ 4.3.2 ทำได้สะดวกและรวดเร็วขึ้น

4.3.4 ดีฟัซซิฟิเคชัน (Defuzzification)

ดีฟัซซิฟิเคชันเป็นกระบวนการที่ใช้อนุมานผลตอบจากการใช้ Fuzzy interface engine ร่วมกับ FRBS ของระบบที่มีอยู่ [45-47,53] ดังแผนภาพการทำงานของระบบฟัซซี่ที่แสดงในรูปที่ 4.7

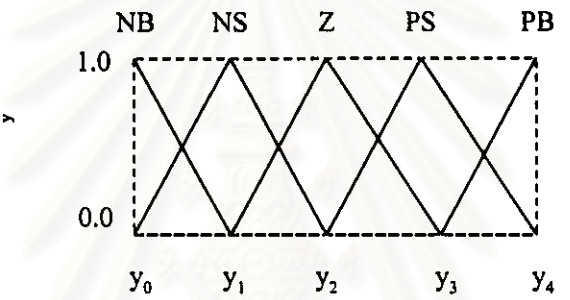


รูปที่ 4.7 แผนภาพการทำงานของระบบฟัซซี่

ในการจำลองผลระบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยทั่วไปจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งกระบวนการสร้างแบบจำลองนั้นทำได้โดยการประมาณค่าให้สอดคล้องกับฟังก์ชันคณิตศาสตร์ที่มีอยู่ ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลตอบสนองต่อค่าตัวแปรทางด้านเข้าได้ กระบวนการอนุมานผลตอบด้วยระบบฟัซซี่นี้เป็นการจำลองผลโดยใช้แบบจำลองของระบบเป็นแบบเชิงเส้น โดยเทียบ

กับ FRBS ของระบบที่เตรียมไว้จากการทดสอบระบบ หรือกฎที่เขียนขึ้นจากประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงาน จากรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นถึงขั้นตอนการอนุมานผลตอบโดยใช้ระบบฟัซซี่ โดยเริ่มจากค่าตัวแปรทางด้านเข้า และแปลงค่าตัวแปรทางด้านเข้าให้เป็นตัวแปรแบบฟัซซี่โดยใช้ฟังก์ชันสมาชิกที่กำหนดขึ้น จากนั้นทำการส่งค่าตัวแปรทางด้านเข้านี้ไปตรวจสอบกับ FRBS ว่าสอดคล้อง (Matching) กับกฎใดบ้างในฐานข้อมูล ในขั้นตอนนี้จะเรียกว่า Fuzzy interface engine คือ ถ้าค่าตัวแปรทางด้านเข้าหนึ่งชุดสามารถสอดคล้องกับกฎในฐานข้อมูลมากกว่าหนึ่งกฎ จำเป็นต้องหาค่าเฉลี่ยจากกฎทุกกฎเพื่อให้ได้ค่าตัวแปรทางด้านออกที่เหมาะสม ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้วิธีหาค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนัก ซึ่งเป็นวิธีที่คล้ายกับการหาจุด Centroid ของพื้นที่ใด ๆ นั่นเอง รายละเอียดของวิธีการดังกล่าวสามารถสรุปๆได้ดังนี้

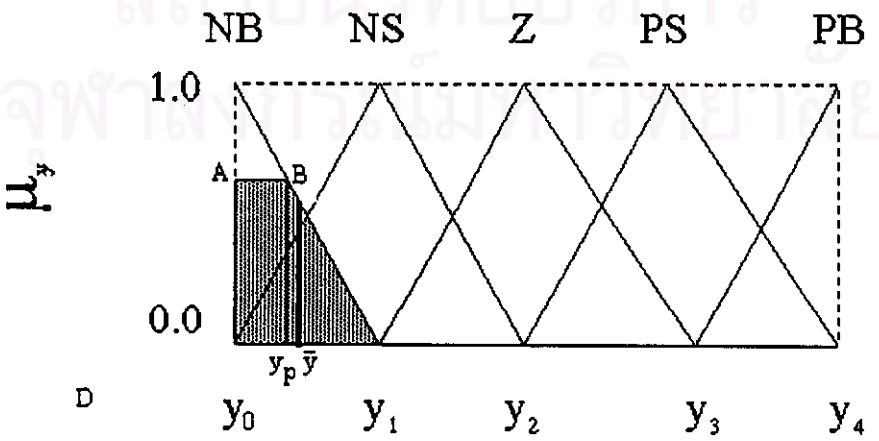
ถ้ากำหนดให้การแบ่งตัวแปรทางด้านออกเป็นไปตามรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 Fuzzy partitions ของตัวแปร y

เนื่องจากตัวแปร y แบ่งออกเป็น 5 เซต ดังนั้นในการพิจารณาค่าเฉลี่ยจึงต้องแยกพิจารณาครั้งละหนึ่งเซต จากนั้นจึงนำผลทั้งหมดมารวมกันเพื่อหาค่าเฉลี่ยต่อไป

1) y ∈NB รูปที่ 4.9 แสดงถึงผลที่เกิดจากการใช้ FRBS ในการอนุมานผลตอบจนได้ค่าตัวแปรทางด้านออก โดยระดับของค่าสมาชิกของ y ถูกกำหนดจาก Highest match method ดังแสดงในหัวข้อ 4.3.2



รูปที่ 4.9 ตัวแปรทางด้านออกเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซต NB

พื้นที่ในส่วนที่แรเงานั้นเกิดจากผลของกระบวนการ Fuzzy interface engine โดยการหาค่าเฉลี่ยของรูปเพื่อใช้อนุมานผลตอบจะได้จุดคำตอบ $\bar{y}$ ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

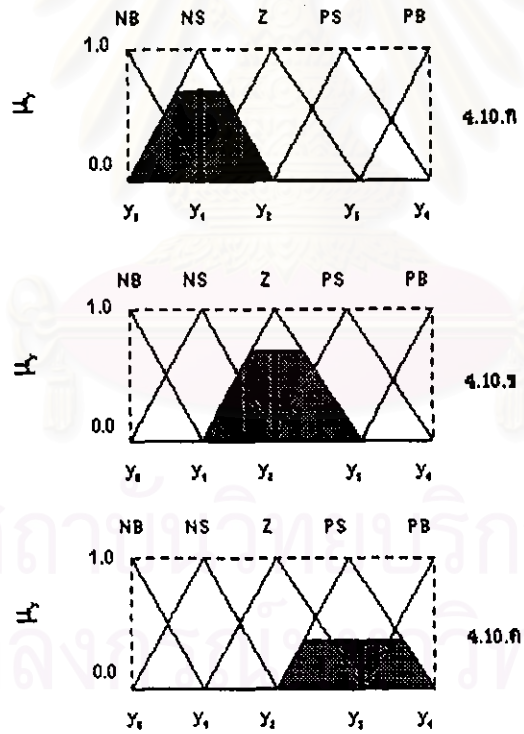
$$y_p = y_0 + (1 - \mu_y)(y_1 - y_0)$$

$$A_1 = (y_p - y_0)\mu_y$$

$$A_2 = \frac{1}{2}(y_1 - y_p)\mu_y$$

$$\bar{y} = \frac{\frac{1}{2}(y_0 + y_p)A_1 + (\frac{2}{3}y_p + \frac{1}{3}y_1)A_2}{A_1 + A_2}$$

2) $y \in NS \vee y \in Z \vee y \in PS$ จากรูปที่ 4.10 จะพบว่ารูปที่แรเงามีความสมมาตรตามแนวแกนตั้ง ดังนั้นค่าเฉลี่ยสามารถคำนวณโดยง่าย



รูปที่ 4.10 ตัวแปรทางด้านออกเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซต NS หรือ Z หรือ PS

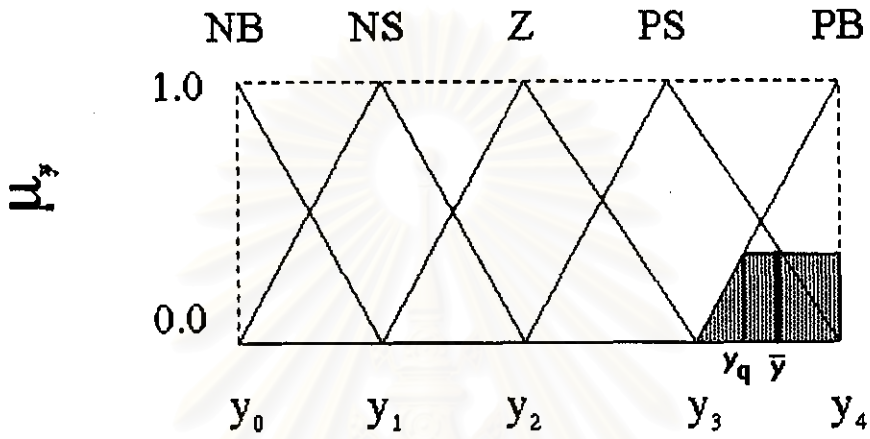
รูปที่ 4.10.ก, ข และ ค นั้นแสดงถึงกรณีที่ $y \in NS$, $y \in Z$ และ $y \in PS$ ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยของ y ในแต่ละช่วงสามารถคำนวณได้ดังนี้

$y \in NS \Rightarrow \bar{y} = y_1$

$y \in Z \Rightarrow \bar{y} = y_2$

$y \in PS \Rightarrow \bar{y} = y_3$

3) $y \in PB$ รูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นพื้นที่ที่เกิดจากการอนุมานผลตอบเช่นเดียวกับในสองข้อแรก การคำนวณในกรณีนี้จะคล้ายกับกรณีแรก



รูปที่ 4.11 ตัวแปรทางด้านออกเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซต PS

จากรูปที่ 4.11 สามารถคำนวณค่าเฉลี่ยของรูปเพื่อใช้อนุมานผลตอบ $\bar{y}$ ได้ดังนี้

$$y_q = y_3 + \mu_y(y_4 - y_3)$$

$$A_3 = \frac{1}{2}\mu_y(y_q - y_3)$$

$$A_4 = \mu_y(y_4 - y_q)$$

$$\bar{y} = \frac{(\frac{1}{2}y_3 + \frac{2}{3}y_q)A_3 + \frac{1}{2}(y_q + y_4)A_4}{A_3 + A_4}$$

4) การอนุมานผลตอบทำได้โดยการรวมกฎใน Rule-based ที่สอดคล้องกับค่าตัวแปรทางด้านเข้าทั้งหมดเข้าด้วยกัน โดยใช้สมการที่ 4.15 ดังนี้

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^{v} \mu_{y_i}\hat{y}_i}{\sum_{i=1}^{v} \mu_{y_i}} \qquad (4.15)$$

เมื่อจำนวนกฎในฐานข้อมูลมีจำนวน V กฎ และ $\hat{y}_i$ แทนค่าเฉลี่ยของพื้นที่ที่เกิดขึ้นจากกฎที่ i ในฐานข้อมูลที่สอดคล้องกับตัวแปรทางด้านเข้านั้น ๆ

4.4 การจำลองผลระบบไม่เป็นเชิงเส้นโดยใช้ FRBS (ระบบไฟฟ้ากำลัง)

ระบบไฟฟ้ากำลังเป็นระบบที่มีการควบคุมกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า ตลอดจนอุปกรณ์ร่วมต่าง ๆ ทำให้พฤติกรรมของระบบมีความไม่เป็นเชิงเส้น การทำงานของระบบโดยใช้การแก้ปัญหาออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์ยิ่งทำให้ระบบมีความซับซ้อนมากขึ้น เนื่องจากจำนวนตัวแปรควบคุมที่ต้องพิจารณามีจำนวนมาก อัตราการลู่เข้าของคำตอบจะช้าลงเมื่อความซับซ้อนของระบบมีมากขึ้น นอกจากนี้ การวางแผนการทำงานของระบบไฟฟ้าโดยใช้การจำลองผลระบบไม่เป็นเชิงเส้นเป็นฐานนั้นต้องการข้อมูลประกอบการพิจารณาเป็นจำนวนมาก ข้อมูลเหล่านั้นได้มาจากการพยากรณ์ระบบหรือประมาณจากผลทดสอบที่มีการบันทึกไว้ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้การจำลองผลเกิดความคลาดเคลื่อน เช่น ข้อมูลจากการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้า (Load forecasting) ข้อมูลของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Transmission system parameters) การประมาณฟังก์ชันค่าเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นต้น

การแก้ปัญหาด้วยวิธีการแก้ปัญหาแบบไม่เป็นเชิงเส้นภายใต้การได้มาของข้อมูลที่มีความคลาดเคลื่อน หรือความไม่แน่นอนสูงนี้ ทำให้ไม่สามารถรับประกันได้ว่าผลเฉลยที่ได้จะเป็นจุดทำงานที่ดีที่สุด เช่น ในการวางแผนการทำงานล่วงหน้า 1 วัน ต้องใช้ข้อมูลการพยากรณ์โหลดล่วงหน้า ซึ่งเมื่อถึงวันที่ต้องปฏิบัติงานตามแผนที่วางไว้ ค่าโหลดที่แท้จริงจะคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ทำนายไว้เสมอ ประกอบกับผลของความคลาดเคลื่อนจากพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบ รวมถึง Cost function ของระบบเองด้วย ทำให้จุดทำงานนั้นไม่ใช่จุดทำงานที่เหมาะสมที่สุดต่อค่าโหลดในขณะนั้น

ดังนั้น ในการการเลือกจุดการทำงานที่เหมาะสมจึงไม่มีความจำเป็นต้องใช้การแก้ปัญหาแบบไม่เป็นเชิงเส้น เพราะนอกจากจะเสียเวลาในการคำนวณมากเกินความจำเป็นแล้ว ยังได้ผลตอบที่มีความคลาดเคลื่อนอีกด้วย จากหลักการของตรรกศาสตร์ฟัซซี่จะพบว่ากระบวนอนุมานผลตอบของระบบฟัซซี่จะสามารถใช้ได้ดีกับระบบที่มีความไม่แน่นอนของข้อมูล ความคลาดเคลื่อนของค่าพารามิเตอร์ของระบบ ระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงจนไม่อาจที่จะทำนายพฤติกรรมของระบบได้อย่างแน่นอน และที่สำคัญที่สุด คือ ผู้ปฏิบัติงานไม่ต้องการความถูกต้องแม่นยำจากผลเฉลยที่ได้มากนัก เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับการเลือกจุดทำงานที่เหมาะสมของระบบไฟฟ้ากำลังแล้ว จะพบว่ามีความเป็นไปได้สูงที่จะประยุกต์ระบบฟัซซี่มาใช้เลือกจุดการทำงานที่เหมาะสม

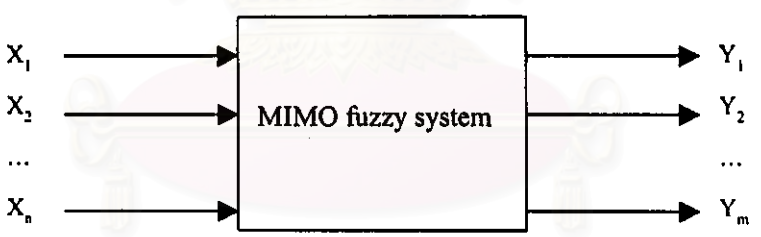
เนื่องจากในระบบไฟฟ้ามีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่เป็นจำนวนมาก ถ้าระบบที่พิจารณามีค่าโหลดที่เปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนในช่วงเวลาที่พิจารณา ซึ่งส่งผลต่อการคัดเลือกเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ให้เดินเครื่องอย่างเหมาะสมในแต่ละช่วงเวลาย่อย ๆ (Unit Commitment : UC) [7,54-55] แตกต่างกันออกไปแล้วจะส่งผลให้โครงสร้างการจัดสรรกำลังผลิตของระบบไฟฟ้ากำลังมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ส่งผลกระทบต่อการวางแผนทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังที่จะประยุกต์ใช้ระบบฟัซซี่ เนื่องจากเมื่อมีการ Shut down เครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกไปจากระบบ หรือขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มเข้ามาในระบบ ฐานข้อมูลของกฎทางฟัซซี่ที่เตรียมไว้จะใช้ไม่ได้จึงจำเป็นต้องสร้างฐานข้อมูลขึ้นมาใหม่ตลอดเวลาทำให้ไม่สะดวกและเกิดความยุ่งยาก โดยเฉพาะเมื่อระบบมีขนาดใหญ่และมีจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก

การประยุกต์ระบบฟัซซี่ต้องมีการพิจารณาอย่างรัดกุมเพื่อให้ครอบคลุมในทุกกรณีที่เป็นไปได้ของระบบ ดังนั้นในที่นี้ได้เสนอแนวทางการประยุกต์ระบบฟัซซี่เพื่อแก้ปัญหาการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังดังนี้

4.4.1 แบบจำลองโดยรวมของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้ FRBS

เป็นการพิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังทั้งระบบโดยใช้ FRBS วิธีการนี้สร้างฐานข้อมูลของกฎทางฟัซซี่ขึ้นมาเพียงหนึ่งชุดเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.12 แบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้จะเป็นแบบจำลองที่มีตัวแปรทางด้านเข้าหลายตัวและตัวแปรทางด้านออกหลายตัว (MIMO)



รูปที่ 4.12 Multi-input-multi-output fuzzy system

แบบจำลองแบบนี้เหมาะสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกตัวในระบบต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าตลอดเวลาและช่วยกันจ่ายโหลด การสร้าง FRBS ในกรณีนี้สามารถทำได้โดยง่าย การพิจารณาตัวแปรทางด้านเข้าและตัวแปรทางด้านออกสามารถทำได้ดังนี้

ตัวแปรทางด้านเข้าของระบบฟัซซี่กำหนดให้เป็นค่าโหลดที่จุดโหลดต่าง ๆ P_{Di} ในระบบตามสมการที่ 4.16

$$P_{Di} \in [P_{Di}^{min}, P_{Di}^{max}] \quad ; i = 1,2,\ldots,N_D \tag{4.16}$$

เมื่อ N_D คือจำนวนจุดโหลดในระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณา

ตัวแปรทางด้านออกของระบบยังคงเป็นตัวแปรควบคุมที่ใช้ในการแก้ปัญหาออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์ดังแสดงในบทที่ 3 ซึ่งประกอบด้วย

$$\underset{\sim}{X} = [P_{Gi}, T_j, V_k, V_{ref}]^T \quad (4.17)$$

อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติเนื่องจากผลของการเลือกเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาแตกต่างกันทำให้ต้องมีการสร้าง Rule-based ให้ครอบคลุมวิธีการเดินเครื่องทุกรูปแบบที่เป็นไปได้ ซึ่งมีอยู่เป็นจำนวนมาก กล่าวคือ

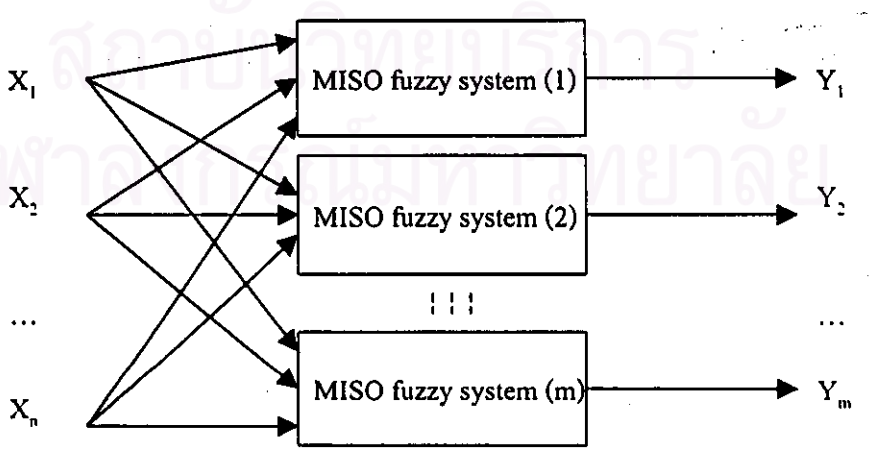
$$N_{RI} = \text{จำนวนวิธีการเดินเครื่องที่เป็นไปได้ในการทำ UC ซึ่งมีค่าเป็น } 2^{N_G} - 1 \quad (4.18)$$

เมื่อ N_G คือ จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดในระบบ

N_{RI} คือ จำนวนชุดของฐานข้อมูลของกฎทางฟัซซี่ที่ต้องสร้างขึ้น

4.4.2 แบบจำลองชนิดแยกส่วนของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้ FRBS

แบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังชนิดนี้นั้นจะพิจารณาแบบจำลองของตัวแปรควบคุมทีละหนึ่งตัวถือเป็นหนึ่งชุดของฐานข้อมูลของกฎทางฟัซซี่ ดังนั้นจำนวนชุดของฐานข้อมูลที่ต้องสร้างขึ้นจะมีจำนวนเท่ากับจำนวนตัวแปรควบคุมในระบบ ซึ่งปกติมีค่าน้อยกว่าจำนวนกรณีที่เป็นไปได้จากการทำ UC เสมอ แบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้จะเป็นแบบจำลองที่มีตัวแปรทางด้านเข้าหลายตัวแต่จะมีตัวแปรทางด้านออกเพียงหนึ่งตัวเท่านั้น (MISO) ดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 Multi-input-single-output fuzzy systems

แบบจำลองชนิดนี้จะพิจารณาอุปกรณ์ใด ๆ ในระบบเป็นหนึ่งฐานข้อมูล เมื่ออุปกรณ์นั้น ๆ มีการต่อเข้ากับระบบจึงจะนำฐานข้อมูลนั้นมาพิจารณา วิธีการนี้จะใช้แบบจำลองจำนวนเท่ากับตัวแปรควบคุมที่ใช้งานอยู่จริงในขณะนั้น เหมาะสำหรับระบบที่มีการทำ UC และการสร้างฐานข้อมูลต้องทำการทดสอบต่อตัวแปรทางด้านเข้าในทุก ๆ Combination ที่เป็นไปได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง

แบบจำลองที่ได้สามารถแบ่งออกเป็นสามประเภทดังนี้

1) <u>แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า</u>

ตัวแปรทางด้านเข้า : P_{Di}

ตัวแปรทางด้านออก : P_{Gi}

2) <u>แบบจำลองของบัสควบคุมและบัสอ้างอิง</u>

ตัวแปรทางด้านเข้า : P_{Di}

ตัวแปรทางด้านออก : V_k

3) <u>แบบจำลองของหม้อแปลง</u>

ตัวแปรทางด้านเข้า : P_{Di}

ตัวแปรทางด้านออก : T_j

จำนวนชุดฐานข้อมูลของกฎทางฟัซซี่ที่ต้องสร้างขึ้นในกรณีนี้สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 4.19

$$N_{R2} = N_G + N_{PV} + N_T + 1 \qquad (4.19)$$

<u>ตัวอย่าง</u> **4.1** ถ้าระบบทดสอบมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 5 เครื่อง มีหม้อแปลง 3 เครื่อง และระบบทดสอบนี้มี 14 บัส

- ถ้าใช้แบบจำลองโดยรวมของระบบไฟฟ้ากำลัง

  $N_{R1} = 2^5-1 = 31$ Rule-based

- ถ้าใช้แบบจำลองชนิดแยกส่วนของระบบไฟฟ้ากำลัง

  $N_{R2} = 5 + 4 + 3 + 1 = 13$ Rule-based

<u>ตัวอย่าง</u> **4.2** ถ้าระบบทดสอบที่พิจารณามีจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบ 10 เครื่อง มีหม้อแปลง 10 เครื่อง แล้ว

- ถ้าใช้แบบจำลองโดยรวมของระบบไฟฟ้ากำลัง

$N_{R1} = 2^{10}-1 = 1023$ Rule-based

- ถ้าใช้แบบจำลองชนิดแยกส่วนของระบบไฟฟ้ากำลัง

$N_{R2} = 10 + 9 + 10 + 1 = 30$ Rule-based

จากตัวอย่างทั้ง 2 ตัวอย่าง ความแตกต่างกันของจำนวน Rule-based มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบเพิ่มขึ้น

4.5 การทำงานที่เหมาะสมของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้การตัดสินใจแบบฟัซซี่

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ Fuzzy Rule-Based System (FRBS) ในการเลือกจุดทำงานที่เหมาะสมของระบบไฟฟ้ากำลัง วิธีการที่นำเสนอได้พัฒนาการสร้างกฎทางฟัซซี่จากฐานข้อมูลเชิงตัวเลขซึ่งได้จากการทำ Off-line Optimal Power Flows โดยรวมกฎที่ถูกสร้างขึ้นเป็นระบบฐานข้อมูลของกฎทางฟัซซี่ และทำการอนุมานจุดทำงานที่เหมาะสมของระบบไฟฟ้ากำลังจากฐานข้อมูลดังกล่าวโดยใช้การทำดีฟัซซีฟิเคชัน(Defuzzyfication)

ขั้นตอนการทำงานจะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ การค้นหาฐานข้อมูล(Database discovery) การสร้างกฎทางฟัซซี่(Fuzzy rule-based systems) และการอนุมานผลตอบที่เหมาะสมโดยใช้กฎทางฟัซซี่ ดังนี้

1.1) การค้นหาฐานข้อมูล ทำการสุ่มค่าโหลดที่เป็นไปได้ของระบบไฟฟ้า จากนั้นทำการแก้ปัญหา OPF โดยวิธีการที่เหมาะสมตามที่ได้ศึกษาในบทที่ 2 จะได้ชุดของข้อมูลเชิงตัวเลขรวมกันเป็นฐานข้อมูล

1.2) การสร้างกฎทางฟัซซี่ จากฐานข้อมูลที่มีอยู่ นำมาสร้างเป็นแบบจำลองกฎทางฟัซซี่ตามกระบวนการที่แสดงในหัวข้อ 4.3.2

1.3) การอนุมานผลตอบที่เหมาะสมโดยใช้กฎทางฟัซซี่ เป็นขั้นตอนที่จะนำไปประยุกต์ใช้งาน โดยใช้ในการวางแผนการทำงานของระบบไฟฟ้าที่กำลังพิจารณา เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของโหลดในระบบไฟฟ้าจะใช้การพิจารณาค่าโหลดว่าอยู่ในช่วงใด จากนั้นทำการอนุมานจุดทำงานที่เหมาะสมของระบบโดยอาศัยการทำดีฟัซซิฟิเคชัน ดังที่ได้แสดงในข้อ 4.3.4

การทำงานที่เหมาะสมนี้จะพิจารณาในช่วงเวลา 1 วัน การทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดนั้นนอกจากจะใช้การทำ OPF แล้ว จำเป็นต้องใช้การทำยูนิตคอมมิตเมนต์(Unit commitment)ด้วย ดังนั้นจะเริ่มต้นการแก้ปัญหาโดยใช้ผลจากการทำยูนิตคอมมิตเมนต์ในแต่ละชั่วโมง แล้วนำผลนี้ไปใช้ในการแก้ปัญหา OPF เพื่อให้ได้ต้นทุนการผลิตโดยรวมต่ำที่สุด

4.6 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอทฤษฎีเซตแบบฟัซซี่ ตรรกศาสตร์ฟัซซี่ ตลอดจนการประยุกต์ใช้ระบบฟัซซี่เพื่อแก้ปัญหาระบบไม่เป็นเชิงเส้น ระบบฟัซซี่เหมาะสำหรับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น มีความไม่แน่นอน หรือความคลาดเคลื่อนของข้อมูล ไม่สามารถทำนายพฤติกรรมหรือจำลองผลทางคณิตศาสตร์ได้โดยง่าย และไม่ต้องการความถูกต้องแม่นยำของผลตอบมากนัก

การประยุกต์ใช้ระบบฟัซซี่นี้ ได้นำเสนอวิธีการจำลองผลโดยใช้แบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังสองลักษณะ คือ แบบจำลองโดยรวมของระบบไฟฟ้ากำลังที่ง่ายในการสร้างฐานข้อมูล แต่ถ้าระบบมีการทำ UC แล้ววิธีการนี้จะยุ่งยาก ไม่เหมาะสม อีกวิธีหนึ่ง คือ แบบจำลองแบบแยกส่วนของระบบไฟฟ้ากำลังโดยจะพิจารณาอุปกรณ์ใด ๆ ในระบบเป็นหนึ่งฐานข้อมูล เมื่ออุปกรณ์นั้น ๆ มีการต่อเข้ากับระบบจึงจะนำฐานข้อมูลนั้นมาพิจารณา วิธีการนี้จะใช้แบบจำลองจำนวนเท่ากับตัวแปรควบคุมที่ใช้งานอยู่จริงในขณะนั้น เหมาะสำหรับระบบที่มีการทำ UC และการสร้างฐานข้อมูลต้องทำการทดสอบต่อตัวแปรทางด้านเข้าในทุก ๆ Combination ที่เป็นไปได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย