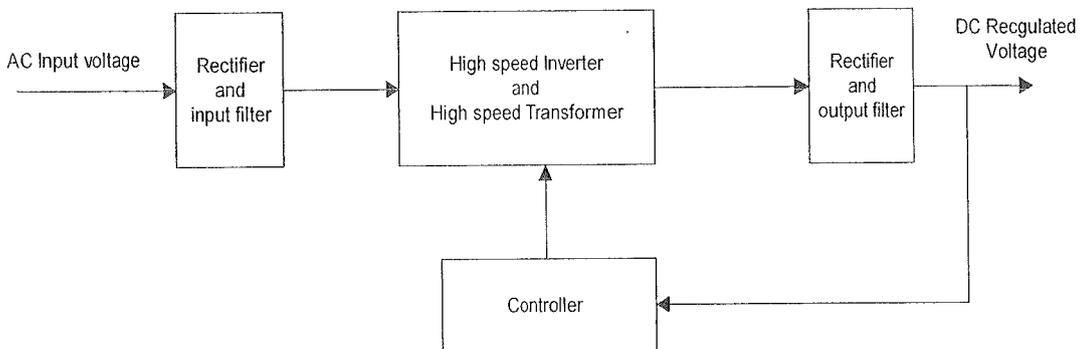


## บทที่ 2

### ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตซิง

แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตซิงโดยทั่วไปนั้นมีส่วนประกอบหลัก 4 ส่วนใหญ่ๆ ด้วยกันเป็นไปตามภาพประกอบที่ 2.1 คือ

1. วงจรเรียงกระแสด้านอินพุต (Input rectifier with RC filter)
2. วงจรอินเวอร์เตอร์กระแสตรงและหม้อแปลงความถี่สูง (High frequency Inverter and High frequency transformer)
3. วงจรเรียงกระแสด้านออกพร้อมกับวงจรกรองแรงดัน (Output Rectifier and Filter Circuit)
4. ตัวควบคุม (Controller)



ภาพประกอบที่ 2.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตซิง

แหล่งจ่ายไฟตรงแบบสวิตซิงโดยทั่วไป ถูกออกแบบมาให้ใช้กับระบบแรงดันไฟสลับ ซึ่งแรงดันไฟสลับจะต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสด้านอินพุต ซึ่งจะถูกเปลี่ยนเป็นไฟกระแสตรงแรงดันสูง จากนั้นวงจรอินเวอร์เตอร์จะทำการสวิตซ์เปลี่ยนแรงดันไฟให้เป็นพัลส์ที่ถี่สูง ซึ่งในส่วน of วงจรสวิตซ์นี้อาจจะสร้างได้จากอุปกรณ์หลายชนิดอาทิเช่น ทรานซิสเตอร์กำลัง, มอสเฟตกำลัง และรูปคลื่นที่ออกจากวงจรสวิตซ์จะถูกส่งเข้าหม้อแปลงความถี่สูง เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตตามต้องการ และแรงดันเอาต์พุตที่ได้นี้จะถูกส่งเข้า อีกครั้งหนึ่ง เพื่อกรองสัญญาณรบกวนและจะได้แรงดันเอาต์พุตตามต้องการ แต่ถึงอย่างไรแรงดันไฟสลับทางด้านอินพุต หรือภาระทางด้านเอาต์พุตอาจเปลี่ยนแปลงไปบ้างเป็นผลทำให้แรงดันเอาต์พุตไม่คงที่ ดังนั้นแรงดันไฟตรงที่ได้จาก วงจรเรียงกระแสด้านเอาต์พุตพร้อมกับวงจรกรองกระแสจะถูกป้อนกลับมาควบคุม และตรวจสอบแรงดันที่เอาต์พุตให้มีค่าคงที่ด้วยอีกทีหนึ่ง

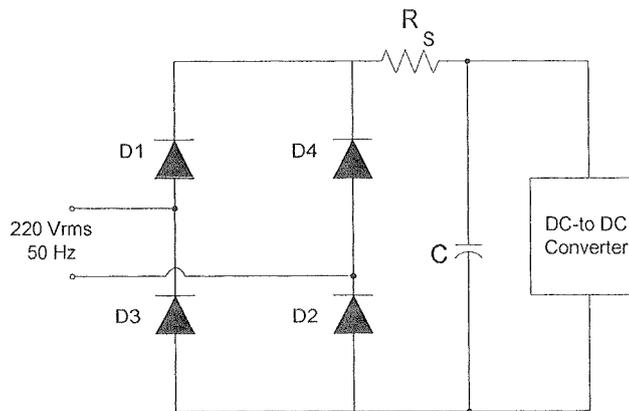
#### 2.1 วงจรเรียงกระแสด้านอินพุต

ในส่วนวงจรอินพุตของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิงวงจรเรียงกระแสและวงจรกรองแรงดัน นับว่าเป็นส่วนที่มีความสำคัญมาก เพราะในส่วนนี้จะรับกำลังงานโดยตรงจากแหล่งจ่าย ซึ่งเราอาจจะแยกส่วนที่สำคัญๆ ของวงจรเรียงกระแสและวงจรกรองแรงดันด้านอินพุตได้ ออกเป็น 3 ส่วนดังนี้ คือ

- วงจรเรียงกระแสด้านอินพุต (Input rectifier)
- ฟิวส์ (fuse)
- วงจรกรองสัญญาณรบกวน(Radio frequency interference, RFI)

### 2.1.1 วงจรเรียงกระแสด้านเข้าพร้อมกับวงจรกรองสัญญาณแบบ RLC

มีหน้าที่เปลี่ยนแรงดันไฟสลับให้เป็นแรงดันไฟตรงเพื่อนำไปเป็นแรงดันด้านอินพุตให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์แรงดันกระแสตรง ซึ่งวงจรเรียงกระแสสามารถแสดง ได้ดังภาพประกอบที่ 2.2



ภาพประกอบที่ 2.2 วงจรเรียงกระแส

วงจรเรียงกระแสที่มีอุปกรณ์ที่สำคัญ 3 ตัวด้วยกันคือ

#### 2.1.1.1 ความต้านทานแฝง ( $R_s$ )

#### 2.1.1.2 ตัวเก็บประจุ (Filter Capacitor, C)

#### 2.1.1.3 ไดโอดเรียงกระแส (Rectifier diode, $D_1$ - $D_4$ )

#### 2.1.1.1 ความต้านทานแฝง( $R_s$ )

ความต้านทาน  $R_s$  เกิดขึ้นมาจากความต้านทานรวมทั้งหมดที่แฝงมาในอุปกรณ์ต่างๆ ได้แก่ ฟิวส์อินพุต, ไดโอด ซึ่งความต้านทาน  $R_s$  จะมีประโยชน์มากในวงจรเรียงกระแส คือ เป็นตัวจำกัดกระแสกระชาก ที่เกิดขึ้นในขณะที่เริ่มเปิดเครื่องทำงาน ฉะนั้นในการเพื่อเป็นการลดกระแสกระชากจะทำได้โดยนำความต้านทานมาต่อเพิ่ม

#### 2.1.1.2 ตัวเก็บประจุ (Filter capacitor)

ตัวเก็บประจุกรองแรงดันจะเป็นตัวกรองแรงดันไฟตรงที่ได้จากการเรียงกระแสของ ไดโอด ทั้ง 4 ตัว ให้เป็นแรงดันไฟตรงที่เรียบมากขึ้น และช่วยให้กระแสที่ได้มีค่าสูงพอแก่ความต้องการของ

วงจรแปลงแรงดัน ซึ่งการทำงานของตัวเก็บประจุกรองแรงดันนั้นจะทำงานในลักษณะการเก็บและคายประจุ ในทางปฏิบัตินั้นเราจะมีหลักเกณฑ์ในการเลือกขนาดและค่าของตัวเก็บประจุกรองแรงดัน ดังนี้

อัตราทนกระแสกระเพื่อม นี้ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานของตัวเก็บประจุกระแส และแรงดันเกิดขึ้นจากการเก็บประจุและคายประจุ ของตัวเก็บประจุเองด้วย

แรงดันกระเพื่อม ซึ่งข้อกำหนดนี้ จะให้กำหนดค่าของตัวเก็บประจุอย่างต่ำในวงจร โดยทั่วไปการออกแบบเรียงกระแสจะกำหนดให้มีแรงดันกระเพื่อมได้ไม่เกิน 10% ของแรงดันไฟตรงที่เอาต์พุต ซึ่งแรงดันกระเพื่อม นี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อภาระใช้กระแสมาก และเราสามารถกำหนดค่าของตัวเก็บประจุกรองแรงดัน เพื่อให้ได้ค่าแรงดันกระเพื่อม ไม่เกิน 10% ของแรงดันไฟตรงที่เอาต์พุต ได้ดังนี้

$$C = \frac{I_{dc} \Delta t}{\Delta V_{r(p-p)}} \quad (2.1)$$

อัตราทนแรงดันตัวเก็บประจุกรองแรงดันที่ใช้ ควรทนแรงดันได้ไม่ต่ำกว่า 1.5 เท่าของแรงดันไฟตรงที่เอาต์พุต เช่น ที่แรงดันไฟตรงเอาต์พุตเท่ากับ 300 โวลต์ ตัวเก็บประจุกรองแรงดัน ในกรณีวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์จะต้องทนได้อย่างน้อย 450 โวลต์ เป็นต้น

ตัวเก็บประจุกรองแรงดันที่ใช้กัน โดยทั่วไปนั้นจะเป็นชนิดอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งจะมีคุณสมบัติให้ความจุและทนแรงดันได้สูง แต่จะมีข้อเสีย คือมีขนาดใหญ่และราคาแพง ยิ่งตัวเก็บประจุมีค่าสูงและทนแรงดันได้สูงมากเท่าไร ก็จะมีราคาแพงและขนาดใหญ่มากขึ้นเท่านั้น

Hold up time เป็นช่วงระยะเวลาอย่างต่ำที่แหล่งจ่ายไฟจะยังคงรักษาแรงดันที่เอาต์พุตได้ตามปกติที่โหลดสูงสุด เพิ่มอินพุตหยุดจ่ายหรือลดลงต่ำกว่าขีดจำกัดที่กำหนดไว้ hold up time นี้จะขึ้นอยู่กับค่าของตัวเก็บประจุกรองแรงดันภาระและแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุกรองแรงดัน ขณะที่แรงดันอินพุตตกหรือหยุดจ่ายกระแสไป

### 2.1.1.3 ไดโอดเรียงกระแส (Rectifier diode)

ในวงจรเรียงกระแส นั้น เรามีหลักในการพิจารณาไดโอดที่จะนำมาใช้งาน จะต้องมามีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

กระแสกระชาก ค่ากระแสสูงสุดในวงจรเรียงกระแส จะเกิดขึ้นในจังหวะที่เกิดการเก็บประจุที่ตัวเก็บประจุกรองแรงดันอีกครั้ง หลังจากการคายประจุแก่ภาระ

อัตราทนกระแสไปอัสตรง เป็นค่ากระแสสูงสุดที่ไดโอดทนได้ โดยไม่พังเสียก่อน โดยทั่วไปควรมีค่ามากกว่า 1.5 - 2 เท่าของค่ากระแสปกติ

อัตราแรงดันไปอัสกลับสูงสุด หรือเรียกอีกชื่อว่าแรงดันสูงสุดของการไปอัสย้อนกลับ เมื่อต่อไดโอดแบบบริดจ์ จะมีแรงดันตกคร่อมไดโอดเมื่อไปอัสกลับเท่ากับแรงดันเอาต์พุตของวงจร แต่เมื่อต่อแบบวงจรเรียงกระแส แบบทวิแรงดันจะมีแรงดันไปอัสกลับเป็น 2 เท่าของแรงดันเอาต์พุตไดโอดที่ใช้ ควรมีค่าอัตราทนแรงดันย้อนกลับสูงสุด ไม่ต่ำกว่าข้อกำหนดข้างต้น

### 2.1.2 ฟิวส์ (Fuse)

ในวงจรเรียงกระแสจะมีอุปกรณ์สำคัญสำหรับป้องกันความเสียหายเนื่องจากกระแสเกินและแยกส่วนวงจรออกจากแหล่งจ่ายไฟกรณีที่มีการลัดวงจรเกิดขึ้น อุปกรณ์ป้องกันที่ใช้ในวงจรเรียงกระแส คือ ฟิวส์ ควรพิจารณาดังนี้คือ

**ค่าอัตราทนแรงดัน** ค่าอัตราทนแรงดันของฟิวส์นับว่าเป็นสิ่งจำเป็นที่ควรนำมาพิจารณาโดยที่ค่าอัตราทนแรงดันของฟิวส์ที่ใช้ควรจะมีค่ามากกว่า หรือเท่ากับค่าของแรงดันในวงจร เพื่อลดการอาร์คของฟิวส์ขณะตัดวงจร ซึ่งฟิวส์มาตรฐานสำหรับงานอิเล็กทรอนิกส์จะมีอัตราทนแรงดันได้ คือ 30, 60, 125, 250, 300, 600 และ 700 โวลต์ เป็นต้น

**ค่าอัตราทนกระแส** ค่าอัตราทนกระแสของฟิวส์สามารถกำหนดได้จากค่ากราฟ RMS ด้านอินพุต ของวงจรเรียงกระแสซึ่งว่าค่ากระแส RMS ของวงจรเรียงกระแส จะขึ้นอยู่กับค่าของภาระ ค่าความต้านทาน  $R_s$  และตัวเก็บประจุกรองแรงดัน ดังนั้นการพิจารณาอัตราทนกระแสของฟิวส์ จึงอาจกำหนดได้จากค่ากระแสของวงจรเรียงกระแสตัวเอง และเพื่อเป็นการเพิ่มอายุการใช้งานเราอาจจะเผื่อค่าอัตราทนกระแสไว้อีก 50% ก็ได้

ดังนั้นในแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซิงจะมีฟิวส์ที่ใช้สำหรับวงจรเรียงกระแส หลายชนิด แต่ที่นิยมนำมาใช้ในวงจรเรียงกระแส คือ ฟิวส์ชนิดขาดช้า เพราะขณะเริ่มทำงานจะมีกระแสกระชากสูงเนื่องจากตัวเก็บประจุกรองแรงดัน ดังนั้นการใช้ฟิวส์ขาดช้าจะทำให้ฟิวส์ไม่ตัดวงจรขณะเปิดเครื่อง

### 2.1.3 วงจรกรองสัญญาณ RFI

ในการทำงานของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซิง จะเป็นการงานในลักษณะการเปลี่ยนแปลงกระแสอย่างทันทีทันใดที่ค่ากระแสสูงๆ ดังนั้นแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซิงจึงเป็นตัวสร้างสัญญาณรบกวนแม่เหล็ก(EMI) และสัญญาณรบกวนความถี่วิทยุ (RFI) ได้อย่างดี ซึ่งจะมีช่วงความถี่รบกวนอยู่ในช่วง 10 kHz ถึง 30 kHz เกิดจากการสวิตซ์ในภาคอินเวอร์เตอร์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจะเป็นรูปแบบของฮาร์มอนิกความถี่สูงอย่างโดดเด่น และความถี่เหล่านี้จะไปรบกวนการทำงานของเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ ได้ไม่ว่าจะเป็นเครื่องรับโทรทัศน์ เครื่องมือวัด ระบบคอมพิวเตอร์ ระบบสื่อสาร ระบบควบคุม ดังนั้นในแหล่งจ่ายไฟตรงแบบสวิตซิงที่ดีจึงต้องมี วงจรกรองสัญญาณรบกวน EMI/RFI

## 2.2 อินเวอร์เตอร์แรงดันกระแสตรง (DC to DC converter)

หลังจากที่ได้เรียนรู้ถึงหลักการออกแบบวงจรเรียงกระแส และวงจรกรองมาแล้ว ต่อไปจะมาพิจารณาถึงอินเวอร์เตอร์แรงดันกระแสตรง ซึ่งจากโคอะแกรมในภาพประกอบที่ 2.1 จะเป็นได้ว่าในส่วนของอินเวอร์เตอร์แรงดันกระแสตรง จะประกอบด้วยส่วนที่สำคัญดังต่อไปนี้

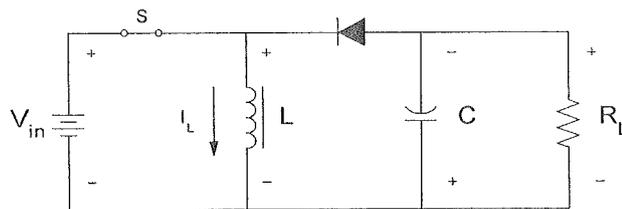
- อินเวอร์เตอร์ความถี่สูง (High frequency inverter)
- หม้อแปลงความถี่สูง (High frequency transformer)

- วงจรเรียงกระแสและวงจรกรองแรงดัน (Input and output rectifier)
- ตัวควบคุม (Controller)

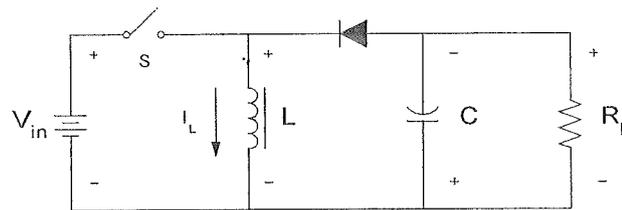
ถึงแม้ว่าคอนเวอร์เตอร์จะมีหลายแบบ แต่ก็ล้วนมีพื้นฐานมาจากวงจร 3 แบบคือ

- ฟลายเบ็ค หรือ บั๊ก-บูสต์ คอนเวอร์เตอร์ (Flyback or Buck-Boost)
- ฟอว์เวิร์ด หรือ บั๊ก คอนเวอร์เตอร์ (Forward or Buck)
- พูช – พูล คอนเวอร์เตอร์ (Push-Pull or Buck-Derived) ซึ่งในตระกูล พูช – พูล นี้ จะสามารถแบ่งย่อยออกได้เป็น ฮาร์ฟบริดจ์ และ ฟูลบริดจ์ คอนเวอร์เตอร์ (Half bridge and full bridge)

### 2.2.1 ฟลายเบ็ค หรือ บั๊ก-บูสต์ คอนเวอร์เตอร์ (Flyback or Buck-Boost)



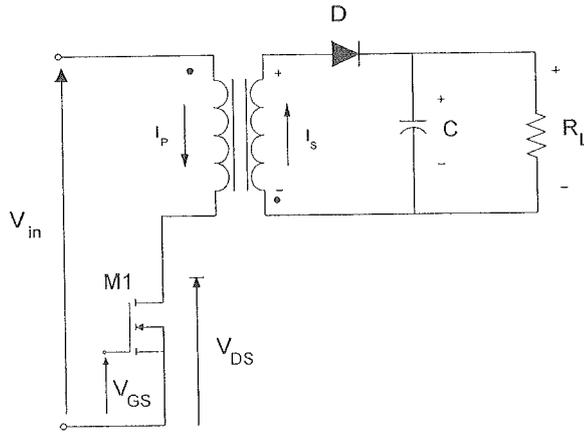
(a)



(b)

#### ภาพประกอบที่ 2.3 วงจรฟลายเบ็ค หรือ บั๊ก-บูสต์ คอนเวอร์เตอร์

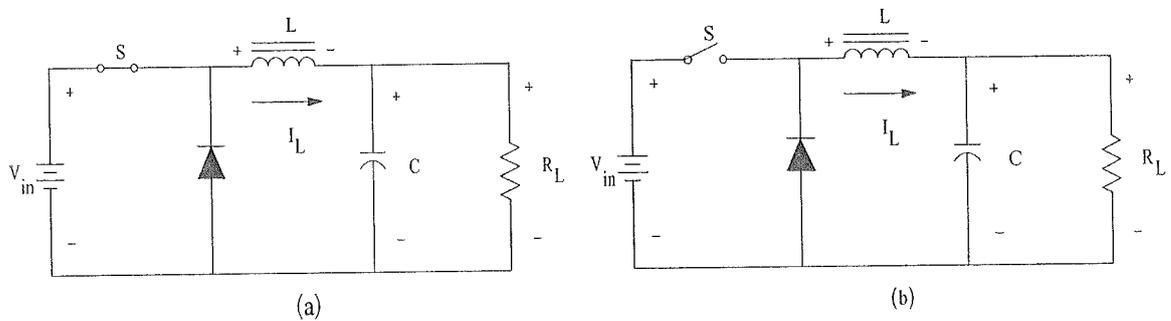
ภาพประกอบที่ 2.3 แสดงลักษณะของฟลายเบ็ค คอนเวอร์เตอร์ เมื่อสวิตช์ S ปิด ภาพประกอบที่ 2.3 (a) กระแสจะไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ สะสมพลังงานในรูปของสนามแม่เหล็ก ไดโอด D จะถูกไบอัสกลับจึงยังไม่มีแรงดันตกคร่อม  $R_L$  ในขณะนี้ต่อมา เมื่อสวิตช์เปิด ภาพประกอบที่ 2.3 (b) ตัวเหนี่ยวนำก็จะคายพลังงานออกมาเนื่องจากสนามแม่เหล็กยุบตัว แต่ขั้วของแรงดันจะกลับกันกับที่ป้อนเข้ามาทำให้ไดโอดได้รับไบอัสตรงนำกระแสจากการคายพลังงานกลับของตัวเหนี่ยวนำไปสู่ภาระ และจะมีขั้วแรงดันตรงข้ามกับแรงดันอินพุต ถ้าสวิตช์เปิด-ปิดเป็นจังหวะอย่างต่อเนื่องกระแสอินพุตและเอาต์พุตก็จะมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมอย่างต่อเนื่องด้วย จึงสามารถจะสรุปได้ว่า ในคอนเวอร์เตอร์ชนิดนี้นั้นพลังงานจะถูกเก็บในตัวเหนี่ยวนำ ในระหว่างที่สวิตช์ปิดและพลังงานจะถูกปล่อยไปสู่ภาระในระหว่างสวิตช์เปิด



ภาพประกอบที่ 2.4 การแยกจากกันทางไฟฟ้าของวงจรฟลายเบ็ค คอนเวอร์เตอร์ แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิงที่ใช้ในงานวิจัย หม้อแปลงแยกจากกันทางไฟฟ้าระหว่างไฟตรง 310 โวลต์กับเอาต์พุต ฟลายเบ็ค คอนเวอร์เตอร์ ที่ใช้กันในทางปฏิบัติดังภาพประกอบที่ 2.4

การทำงานฟลายเบ็ค คอนเวอร์เตอร์ ก็คือ เมื่อมอสเฟต  $M_1$  นำกระแส กระแสจะไหลผ่านขดปฐมภูมิ และสะสมพลังงานไว้ แต่แรงดันที่เกิดขึ้นที่ขดทุติยภูมิจะมีขั้วตรงกันข้ามกับขดปฐมภูมิ (สังเกตจากจุดที่ขดปฐมภูมิ) ดังนั้นจึงไม่มีพลังงานปล่อยไปยังภาระ เพราะไดโอดถูกไบอัสกลับและเมื่อ  $M_1$  หยุดนำกระแสของปฐมภูมิ ของหม้อแปลงจะคายพลังงานออกมาแต่ขั้วแรงดันจะกลับกัน ทำให้ไดโอดด้านทุติยภูมิ ได้รับไบอัสตรงนำกระแสผ่านไปยัง ภาระและตัวเก็บประจุ แม้ว่าหม้อแปลงจะทำให้หน้าที่แยกจากกันทางไฟฟ้าแล้วยังกระทำตัวเป็นโช้ค อีกด้วย ซึ่งในทางทฤษฎีไม่จำเป็นต้องใส่ตัวเหนี่ยวนำที่เอาต์พุตอีก แต่ในทางปฏิบัติจำเป็นต้องใส่ตัวเหนี่ยวนำค่าน้อยๆ ไว้ตรงระหว่างไดโอดและตัวเก็บประจุ เพื่อทำการกำจัดสัญญาณรบกวน EMI/RFI ที่เกิดจากการสวิตช์ของคอนเวอร์เตอร์เอง

### 2.2.2 ฟอว์เวิร์ด หรือ บัค คอนเวอร์เตอร์ (Forward or Buck)



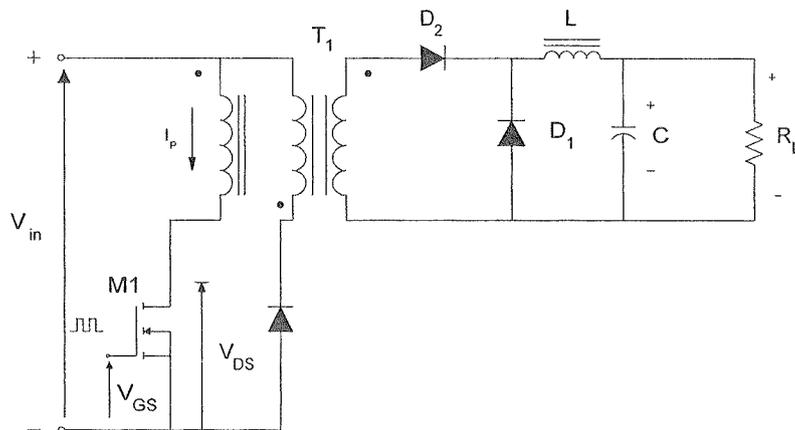
ภาพประกอบที่ 2.5 วงจรฟอว์เวิร์ด หรือ บัค คอนเวอร์เตอร์

ภาพประกอบที่ 2.5 แสดงการทำงานของ ฟอว์เวิร์ด คอนเวอร์เตอร์เมื่อสวิตช์ปิดกระแสจะไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำไปสู่ภาระ ทำให้มีแรงดันตกคร่อมภาระและมีขั้วเหมือนกับอินพุต ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.5(a) ไดโอดจะถูกไบอัสกลับ ในตอนนี้และเมื่อสวิตช์เปิดสนามแม่เหล็กที่ตัวเหนี่ยวนำจะยุบตัวคายพลังงานออกมาในรูปกระแสและมีขั้วแรงดันดังภาพประกอบที่ 2.5(b) ทำให้

ไดโอดได้รับ ไบอัสตรงนำกระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุและภาระ แรงดันที่ตกคร่อมภาระจึงยังมีขั้วเหมือนเดิม ไดโอดในวงจรนี้มักจะถูกเรียกว่า free wheeling หรือ flywheel diode เพราะการทำงานดังกล่าวกระแสเอาต์พุต ที่ได้จะต่อเนื่อง ถึงแม้ขณะที่กระแสอินพุตจะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมก็ตาม

แต่ถึงอย่างไรก็ตามรูปแบบวงจรพื้นฐานของฟอว์เวิร์ด คอนเวอร์เตอร์ ที่แสดงในภาพประกอบที่ 2.5 นั้นจะไม่ได้รับการแยกกันทางไฟฟ้าระหว่างอินพุต กับ เอาต์พุต จึงไม่ค่อยปลอดภัยนัก ดังนั้นจึงพัฒนามาเป็นวงจรในภาพประกอบที่ 2.6 เมื่อ  $M_1$  ทำงานจะมีกระแสไหลผ่านขดทุติยภูมิ ของหม้อแปลงและเก็บพลังงานไว้ในรูปสนามแม่เหล็กและยังส่งสนามแม่เหล็กบางส่วนไปคล้องเกี่ยวอีก 2 ขด ที่เหลือ โดยแรงดันที่จุดของปฐมภูมิ และทุติยภูมิ จะมีขั้วเหมือนกันตลอด ดังนั้นในขณะนี้จึงมีกระแสไหลผ่านไดโอด  $D_2$  พลังงานในตัวเหนี่ยวนำ และส่งต่อไปยังภาระ  $R_L$  ส่วน  $D_3$  จึงจะถูก ไบอัสกลับ เมื่อ  $M_1$  หยุดทำงานสนามแม่เหล็กในหม้อแปลงจะยุบตัวทำให้ขั้วแรงดันที่จุดทางด้านทุติยภูมิ เปลี่ยนเป็นลบ  $D_2$  จึงถูกไบอัสกลับ ดังนั้นตัวเหนี่ยวนำจึงคายพลังงานโดยผ่าน  $R_L$  และ  $D_3$  แต่สำหรับขดกลาง คือ ขด Magnetization ของหม้อแปลง  $T_1$  นั้นจะทำหน้าที่หักล้างสนามแม่เหล็กตกค้าง เมื่อ  $M_1$  หยุดทำงาน โดยจะส่งพลังงานแม่เหล็กกลับจากทิศทางเดิมในรูปของกระแส โดยกระแส Magnetization มีค่าเท่ากับสมการที่ 2.2

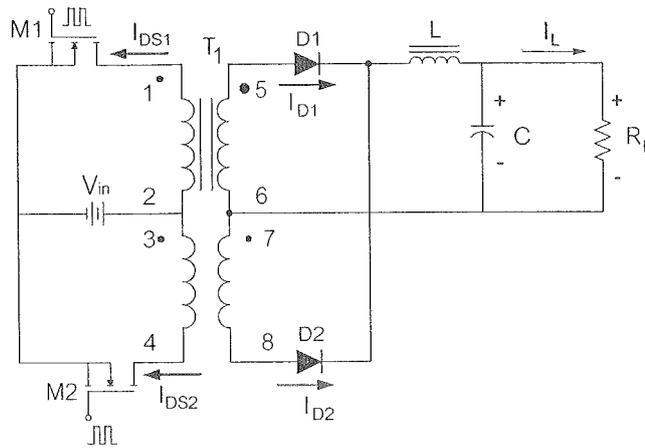
$$I_{max} = \frac{TD_{(max)}V_m}{L} \quad (2.2)$$



ภาพประกอบที่ 2.6 การแยกจากกันทางไฟฟ้าของวงจรฟอว์เวิร์ด หรือ บั๊ก คอนเวอร์เตอร์

### 2.2.3 พูช – พูล คอนเวอร์เตอร์ (Push-Pull or Buck-Derived)

การทำงานของพูช – พูล คอนเวอร์เตอร์ เปรียบเหมือนการนำ ฟอว์เวิร์ด คอนเวอร์เตอร์ 2 วงจรมาต่อร่วมกัน โดยผลัดกันทำงานในแต่ละครึ่งคาบเวลาในลักษณะกลับเฟส ลักษณะวงจรพื้นฐานของพูช – พูล คอนเวอร์เตอร์ ดังภาพประกอบที่ 2.7



ภาพประกอบที่ 2.7 วงจรพุก – พูล คอนเวอร์เตอร์

ลักษณะการทำงานของ พุก – พูล คอนเวอร์เตอร์ จะทำงานดังนี้คือ เมื่อ  $M_1$  นำกระแสก็จะมีกระแสไหลผ่านขดปฐมภูมิของ  $T_1$  จากจุด 2 ไปยังจุด 1 ดังนั้นจุด 5 และ 7 ทางด้านขดทุติยภูมิจึงมีศักย์เป็นลบ เมื่อเทียบกับจุด 6 และ 8 ตามลำดับ  $D_1$  จึงถูกไบอัสกลับในขณะที่  $D_2$  ได้รับไบอัสตรงนำกระแส  $I_{D2}$  ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและภาระ และในลักษณะเดียวกันเมื่อ  $M_2$  นำกระแสก็จะมีกระแสไหลผ่านจากจุด 3 ไปจุด 4 ของขดปฐมภูมิ ทำให้จุด 5 และ 7 มีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับจุด 6 และ 8 ตามลำดับ  $D_1$  จึงนำกระแส  $I_{D1}$  ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและภาระ ในขณะที่  $D_2$  ถูกไบอัสกลับแรงดันเอาต์พุตที่ตกคร่อมภาระ ( $R_L$ ) สามารถหาได้จากสมการที่ 2.3

$$V_{out} = 2D \times V_m \left( \frac{N_s}{N_p} \right) \quad (2.3)$$

ข้อดีของ พุก – พูล คอนเวอร์เตอร์

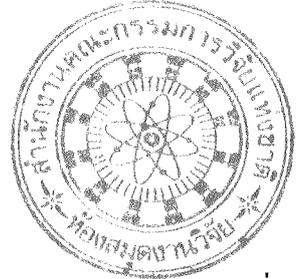
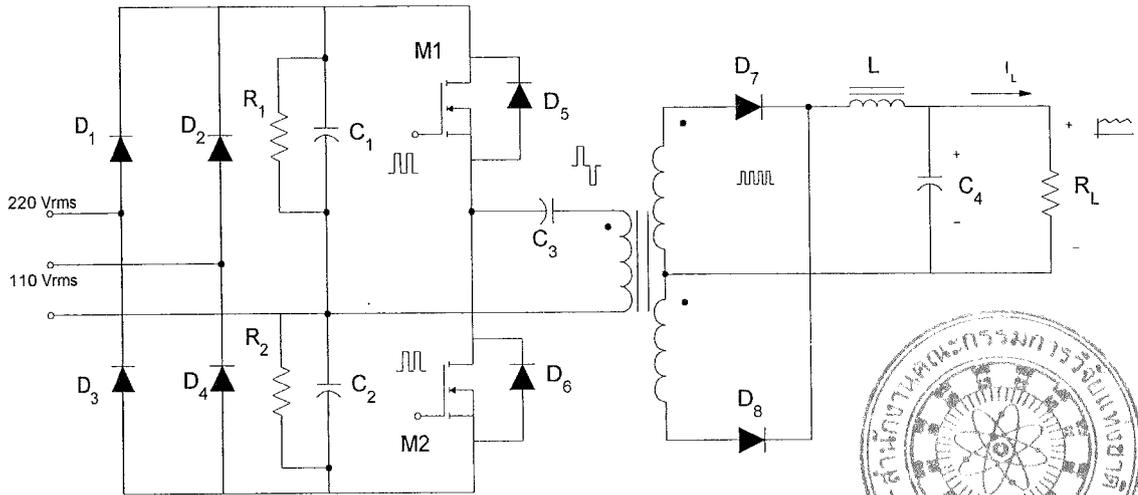
- ปริมาตรของแกนเล็กลง
- มอสเฟตทั้งสองถูกขับด้วยกราวด์เดียวกัน ทำให้วงจรขับเคลื่อนไม่ยุ่งยาก

ข้อเสียของ พุก – พูล คอนเวอร์เตอร์

- มอสเฟตกำลังที่ใช้จะต้องสามารถทนแรงดันได้มากกว่า 2 เท่าของแรงดันอินพุต
- มอสเฟตกำลังที่ทนกระแสและแรงดันสูงๆ หาได้ยากและมีราคาแพง
- เกิดปัญหาฟลักซ์ไม่สมมาตรในแกนเฟอร์ไรต์ของวงจร

#### 2.2.4 ฮาร์ฟบริดจ์ คอนเวอร์เตอร์ (Half Bridge Converter)

ฮาร์ฟบริดจ์ คอนเวอร์เตอร์ จัดว่าเป็นคอนเวอร์เตอร์ตระกูลเดียวกับพุก – พูล คอนเวอร์เตอร์ เพราะใช้หลักการเดียวกัน แต่ลักษณะการจัดวงจรของ ฮาร์ฟบริดจ์ คอนเวอร์เตอร์ จะทำให้มอสเฟตภายในวงจรมีแรงดันตกคร่อมขณะหยุดนำกระแสเพียงค่าแรงดันอินพุตเท่านั้น ดังภาพประกอบที่ 2.8



ภาพประกอบที่ 2.8 วงจรฮาร์ฟบริดจ์ คอนเวอร์เตอร์

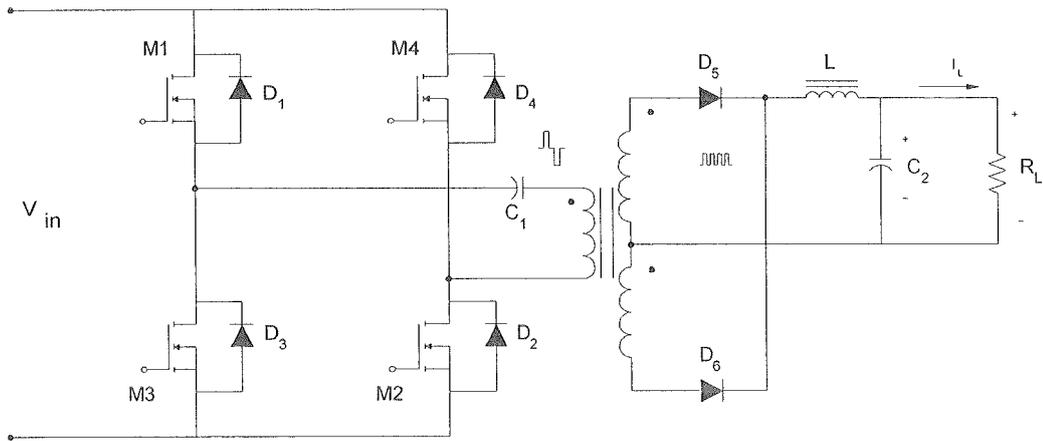
จากภาพประกอบที่ 2.8 ได้ว่าขดปฐมภูมิแต่ละด้านของหม้อแปลง จะถูกต่ออยู่กับจุดที่มีแรงดันไฟตรงเป็นครั้งหนึ่ง โดยมีมอสเฟต  $M_1$  และ  $M_2$  เป็นสวิตช์ตัดต่อ ทำให้ได้รูปคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าของขดปฐมภูมิ ของหม้อแปลง จากนั้นจึงทำการเรียงกระแสและกรอง ด้านเอาต์พุตของทุติยภูมิ ด้วย  $D_7$ ,  $D_8$ ,  $L$  และ  $C_4$  ได้เป็นไฟกระแสตรงป้อนแก่ภาระ

ซึ่งลักษณะการทำงานของ ฮาร์ฟบริดจ์ คอนเวอร์เตอร์ จะมีข้อดี คือ ขณะที่ มอสเฟต  $M_1$  และ  $M_2$  ไม่ทำงานจะมีแรงดันตกคร่อมน้อยกว่าแรงดันอินพุตครั้งหนึ่ง จึงทำให้สามารถใช้ มอสเฟตที่ทนแรงดันไม่สูงนักได้ แต่จะมีข้อเสีย คือ กระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตกำลังขณะทำงานจะมีค่าเป็น 2 เท่าของแบบ พูช – พูล คอนเวอร์เตอร์

### 2.2.5 ฟลูบริดจ์ คอนเวอร์เตอร์ (Full Bridge Converter)

จาก ฮาร์ฟบริดจ์ คอนเวอร์เตอร์ ที่สามารถลดแรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์ลงมาครึ่งหนึ่งของ  $V_{in}$  และสามารถป้องกันไม่ให้แกนของหม้อแปลงอิ่มตัวแล้ว แต่ว่าจะมีปัญหาเรื่องกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตกำลัง ทำงานเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของแบบพูช-พูลคอนเวอร์เตอร์ ดังนั้นจากข้อจำกัดของฮาร์ฟบริดจ์ คอนเวอร์เตอร์ ที่กล่าวไปแล้วนั้น จะเป็นผลทำให้ฮาร์ฟบริดจ์ คอนเวอร์เตอร์ ในงานที่ต้องการกำลังต่ำ และปานกลางไม่สูงมากนัก เพราะว่า มอสเฟตกำลัง ที่ทนแรงดันประมาณ 400-500 โวลต์ แต่ทนกระแสได้สูงๆ นั้นหายากและมีราคาแพง ดังนั้นจึงได้พัฒนาจน ได้ฟลูบริดจ์ คอนเวอร์เตอร์ ขึ้นมา ซึ่งคอนเวอร์เตอร์ชนิดนี้จะรวมนำเอาข้อดีทางด้านกระแสของ พูช-พูล และลักษณะเด่นด้านแรงดันของ วงจรฮาร์ฟบริดจ์ ไว้ด้วยกัน ดังภาพประกอบที่ 2.9

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่..... 20 ..... 2555
เลขทะเบียน..... 244076
เลขเรียกหนังสือ.....



ภาพประกอบที่ 2.9 วงจรฟลูบริดจ์ คอนเวอร์เตอร์

โดยการทำงานของฟลูบริดจ์ คอนเวอร์เตอร์ นั้น จะทำงานโดยที่มอสเฟตกำลัง  $M_1$  นำกระแสพร้อมกับ  $M_2$  และ  $M_3$  นำกระแสพร้อมกับ  $M_4$  โดยแต่ละคู่จะผลัดกันทำงาน ซึ่งจากการทำงานในลักษณะเช่นนี้ จะทำให้แรงดันที่ขดปฐมภูมิของหม้อแปลง มีแรงดันเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง  $V_{in}$  อีกทั้งกระแสที่ไหลผ่านก็ยังเท่ากับวงจรพวง-พูลอีกด้วย แต่ข้อเสียของวงจรนี้ก็คือ ต้องใช้มอสเฟต ถึง 4 ตัว และเนื่องจากต้องให้คู่มอสเฟต ทำงานไม่พร้อมกัน ดังนั้นจึงต้องแยกใช้วงจรขับเกทของมอสเฟต แต่ละคู่ออกจากกัน โดยเด็ดขาด

วงจรกรองแรงดันด้านเอาต์พุต ของแหล่งจ่ายไฟสวิตซิง แบบฮาร์ฟบริดจ์ คอนเวอร์เตอร์ หรือแบบ ฟลูบริดจ์ คอนเวอร์เตอร์ นิยมจะใช้โครงสร้างวงจร ตามภาพประกอบที่ 2-10 จากทฤษฎีพื้นฐานแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ

$$V_L = L \frac{di}{dt}$$

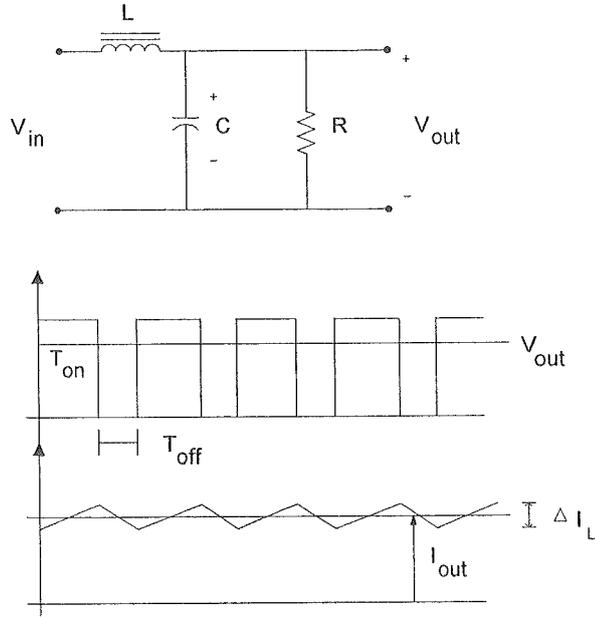
$$di = \Delta L_L$$

$$dt = t_{off} = \frac{(1-D)}{2f}$$

ในกรณีของ ฮาร์ฟบริดจ์ คอนเวอร์เตอร์ หรือฟลูบริดจ์ คอนเวอร์เตอร์ แรงดัน  $V_{in}$  จะมีค่าเป็นสองเท่าของแรงดัน  $V_{out}$  ทำให้ได้สมการหาค่าความเหนี่ยวนำในวงจรกรองแรงดันด้านเอาต์พุตได้จากสมการที่ 2.4

$$L = \frac{V_{out}(1-D) \times 10^4}{2f\Delta I_L} \quad (2.4)$$

จากภาพประกอบที่ 2.10 ในทางปฏิบัติเพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตที่ราบเรียบ  $\Delta I_L$  จะต้องไม่เกิน  $0.25I_{out}$



ภาพประกอบที่ 2.10 วงจรและรูปสัญญาณแรงดันเอาต์พุต

### 2.2.6 หม้อแปลงความถี่สูง ( High Frequency Transformer)

เมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวด จะพบว่รอบๆ แกนปิด จะเกิดการเหนี่ยวนำฟลักซ์ขึ้นภายในแกน และถ้าเพิ่มจำนวนขดลวดอีกขดหนึ่งให้พันอยู่ในแกนเดียวกัน ฟลักซ์จะเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงดัน และกระแสไหลที่ขดลวดที่สอง เราเรียกขดลวดที่หนึ่งว่า ขดลวดปฐมภูมิ และขดลวดที่สอง ที่พันเพิ่มเข้าไปว่า ขดลวดทุติยภูมิ

โดยทั่วไปแล้วหม้อแปลงจะมีแรงดันเอาต์พุตสูงหรือต่ำ เกิดจากสัดส่วนการพัน โดยกำหนดจากสมการที่ 2.5

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{V_p}{V_s} \quad (2.5)$$

ดังนั้นหม้อแปลงก็จะสามารถทำงานเป็น Step-up หรือ Step-down ได้โดยสามารถทำให้แรงดันที่ขดลวดทุติยภูมิ นั้นสูงกว่าหรือต่ำกว่าที่ขดลวดปฐมภูมิ และถ้าเพิ่มขดลวดทุติยภูมิ มีอีกหลายๆ ขด เราก็จะได้แรงดันเอาต์พุตอีกหลายระดับตามสัดส่วนการพันเช่นกัน ประโยชน์ที่สำคัญอีกข้อหนึ่ง โดยใช้ลักษณะสมบัติของหม้อแปลงดังที่ได้กล่าวมาแล้ว นั่นคือการแยกกันทางไฟฟ้า (Electrical Isolation) ที่เกิดขึ้นระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ จากความสัมพันธ์พื้นฐานของหม้อแปลง สมการที่ 2.6

$$e = NA_e \left( \frac{dB}{dt} \right) \times 10^{-8} \quad (2.6)$$

เราสามารถคำนวณหาความหนาแน่นฟลักซ์ (B) ที่แน่นอนได้ โดยกำหนดการทำงานของหม้อแปลงให้อยู่ในส่วนที่เป็นเชิงเส้นของกราฟ ดังสมการที่ 2.7

$$B_{\max} = \frac{V_p \times 10^8}{KfN_p A_e} \quad (2.7)$$

ปกติแล้วผู้ออกแบบหม้อแปลงมักจะกำหนด  $B_{\max}$  ด้วยตนเอง ภายในบริเวณเชิงเส้นตรงของกราฟ B-H จุดที่เหมาะสมที่สุดก็คือ  $B_{\max} = \frac{B_{sat}}{2}$  จากสมการที่ 2.7 จะได้จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ จากสมการที่ 2.8

$$N_p = \frac{(V_p)10^8}{4fB_{\max} A_e} \quad (2.8)$$

ในกรณีเลือกแกนนั้นก็ยังมีค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญๆ อีก 2 ตัวแปรก็คือ พื้นที่การพันของแกน (หรือบอบบิ้น) ซึ่งจะต้องเลือกให้กว้างพอกับขนาดของเส้นลวด เพื่อให้เกิด Winding loss น้อยที่สุด และตัวแปรสองคือ Core's Power Handling Capability สมการของตัวพารามิเตอร์มีดังสมการที่ 2.9

$$P_{out} = (1.16B_{\max} f d A_e A_e)10^{-9} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $P_{out}$  คือ power handing of core, W

ผู้ผลิตบางรายใช้สัญลักษณ์  $W_a$  สำหรับพื้นที่หน้าตัดของบอบบิ้น แทนสัญลักษณ์  $A_e$  โดยปกติแล้ว ความหนาแน่นกระแสมีหน่วยใน Circular Mills Per Ampere ใช้สัญลักษณ์เป็น D โดยเขียนเป็นความสัมพันธ์กับ d ได้ดังสมการที่ 2.10

$$d = \frac{1.27 \times 10^6}{D} \quad (2.10)$$

แทนสมการทั้งสองข้างต้นจะได้สมการที่ 2.11

$$P_{out} = \frac{(1.47 f B_{\max} A_e A_e)10^{-3}}{D} \quad (2.11)$$

สมการที่ 2.12 เป็นสมการที่ใช้กันมากในการคำนวณ และเลือกขนาดของแกนหม้อแปลง

$$A_c A_w = \frac{(0.68 P_{out} D)10^3}{f B_{\max}} \quad (2.12)$$

ความหนาแน่นกระแส (D) จะถูกกำหนดโดยผู้ผลิตเส้นลวด ที่ความหนาแน่นกระแส 1000 centimeter per ampere(cm/A) ในทางปฏิบัติจะเลือกใช้ความหนาแน่นกระแส 500 cm/A

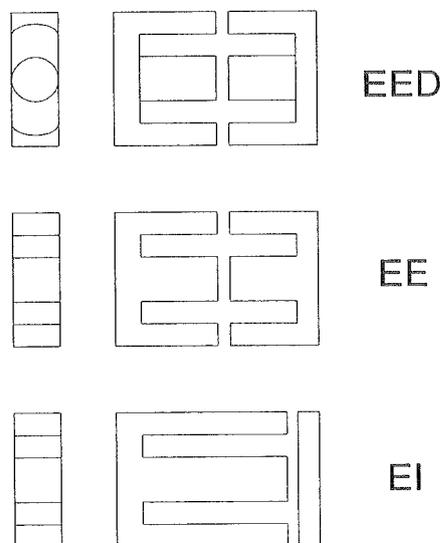
### ส่วนประกอบของหม้อแปลงสวิตชิง

หม้อแปลงสวิตชิงมีหน้าที่หลักในการลดทอนแรงดันไฟตรงที่อินพุตของคอนเวอร์เตอร์ซึ่งอาจมีค่าสูงได้ถึง 310 โวลต์ ให้มีค่าลดลงเป็นแรงดันไฟค่าต่ำที่เอาต์พุต และทำให้เกิดการแยกกันทางไฟฟ้าระหว่างแรงดันอินพุต และแรงดันเอาต์พุตที่ได้ เพื่อป้องกันอันตรายจากการถูกไฟฟ้าดูด ส่วนประกอบที่สำคัญของหม้อแปลงสวิตชิงมีรายละเอียดดังนี้

### แกนเฟอร์ไรต์ (Ferrite Core)

เฟอร์ไรต์เป็นวัสดุประเภทเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic material) การเหนี่ยวนำแม่เหล็กบนแกนเฟอร์ไรต์จะมีผลทำให้เกิดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงกว่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนแกนอากาศมาก เฟอร์ไรต์มีค่าจุดอิ่มตัวฟลักซ์แม่เหล็กค่อนข้างสูง ประมาณในช่วง 3,000 ถึง 4,000 เกาส์ และเกิดการสูญเสียในตัวมันต่ำที่ความถี่สูงๆ ดังนั้นหม้อแปลงสวิตชิงจึงนิยมใช้แกนเป็นแกนเฟอร์ไรต์มากที่สุด เฟอร์ไรต์ที่นำมาใช้ทำแกนของหม้อแปลงสวิตชิงจะมีรูปร่างแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับการใช้งานและมาตรฐานในการออกแบบ

ลักษณะและขนาดมาตรฐานของแกนเฟอร์ไรต์ ซึ่งแกนเฟอร์ไรต์สำหรับหม้อแปลงสวิตชิงโดยทั่วไป จะถูกผลิตออกมาที่ขนาดและรูปทรงต่างๆ ตามมาตรฐานเดียวกัน เช่น แกนแบบ EI, EE, ETD หรือแกนแบบ POT เป็นต้น ปกติผู้ผลิตจะทำแกนเฟอร์ไรต์ออกมาในลักษณะของคู่ประกบเพื่อความสะดวกในการประกอบเข้ากับบอบบิ้น การประกอบแกนเฟอร์ไรต์บนบอบบิ้นจะทำให้ทางเดินของฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์มีลักษณะเป็นวงบรรจบได้ ลักษณะของแกนเฟอร์ไรต์แบบต่างๆ ดังภาพประกอบที่ 2.11



ภาพประกอบที่ 2.11 ลักษณะแกนเฟอร์ไรต์

### 2.2.7 ทรานซิสเตอร์กำลัง

ในระบบแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง ส่วนมากมักจะใช้ทรานซิสเตอร์กำลังราวๆ 50 เปอร์เซ็นต์ แต่ในสภาวะปัจจุบัน มอสเฟตได้เข้ามาแทนที่อย่างรวดเร็ว แต่ข้อดีของทรานซิสเตอร์กำลังก็มีอยู่ คือ มีอัตราทนแรงดันสูงและมีราคาถูก

การออกแบบทรานซิสเตอร์กำลังนั้น ต้องคำนึงถึงกราฟคุณลักษณะของทรานซิสเตอร์กำลังตัวนั้นๆ ด้วย เพราะทรานซิสเตอร์นั้นเป็นอุปกรณ์ที่ควบคุมด้วยกระแส โดยกระแสควบคุมนั้นได้จากสมการที่ 2.13

$$I_b > \frac{I_e}{h_{fe}} \quad (2.13)$$

กำลังงานสูญเสียในรูปความร้อนของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลัง

กำลังงานสูญเสียเป็นไปได้ 2 ลักษณะ คือ กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นขณะเปลี่ยนสถานะการทำงาน (Switching loss) และกำลังงานสูญเสียขณะนำกระแสที่จุดอิ่มตัว (Saturation loss) แต่กำลังงานสูญเสีย นั้นจะเกิดขณะ ที่เริ่มหยุดนำกระแสเป็นหลัก

การทำให้กำลังสูญเสียขณะเริ่มหยุดนำกระแสมีค่าน้อยที่สุดจะทำให้ทรานซิสเตอร์กำลังมีประสิทธิภาพสูงสุดและจะช่วยลดความร้อนที่เกิดขึ้นที่ทรานซิสเตอร์กำลังขณะทำงานด้วย

การพิจารณาในการเลือกใช้ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลังควรพิจารณาดังนี้ คือ

- อัตราทนแรงดันและกระแสสูงสุด
- ความเร็วในการเปลี่ยนสถานะ
- อัตราทนกำลังสูญเสีย

โดยทั่วไปผู้ผลิตมักจะให้กราฟแสดงพิสัยปลอดภัย SOA(Safe Operating Area) มาพร้อมกับข้อมูลอุปกรณ์ กราฟ SOA จะมี 2 ลักษณะคือ FBSOA(Forward Bias Safe Operating Area) และ RBSOA(Reverse Bias Safe Operating Area)

การออกแบบควรพิจารณาเงื่อนไขต่างๆ ที่จะเกิดกับทรานซิสเตอร์กำลัง ขณะเริ่มนำกระแสด้วย โดยต้องจำกัดค่าแรงดันตกคร่อมและกระแสสูงสุดขณะเริ่มนำกระแส ให้มีค่าอยู่ภายใต้พื้นที่ของกราฟ FBSOA และพิจารณาช่วงเวลาขณะเริ่มหยุดนำกระแสจะแสดงโดยกราฟ RBSOA และขึ้นอยู่กับการระบายความร้อนของทรานซิสเตอร์กำลังขณะเริ่มหยุดนำกระแสด้วย

### 2.2.8 มอสเฟตกำลัง

ในปัจจุบัน มอสเฟตได้มีบทบาทมากในวงจรแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง เพราะสามารถทำงานได้ดีที่ความถี่สูง และใช้เวลาในการเปลี่ยนสถานะค่อนข้างสั้น มอสเฟตกำลังจะใช้แรงดันเป็นตัวควบคุมการทำงานและเช่นเดียวกับทรานซิสเตอร์กำลังขณะอิ่มตัวจะได้

$$g_m = \frac{I}{R_{DS(on)}} \quad (2.14)$$

$$I_D = \frac{g_m}{2} (V_{GS} - V_T) \quad (2.15)$$

### กำลังงานสูญเสียในรูปควาร้อนของมอสเฟตกำลัง

มี 2 ลักษณะเช่นเดียวกับเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ คือ กำลังงานสูญเสียขณะเปลี่ยนสถานะและกำลังงานสูญเสียขณะนำกระแส แต่ช่วงเวลาการเปลี่ยนสถานะของมอสเฟตกำลังจะสั้นกว่าเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์มาก เพราะตามโครงสร้างจะไม่มีประจุสะสมเกิดขึ้นในตัวมอสเฟตกำลัง แต่จะมีค่าความต้านทานขณะนำกระแสสูงกว่าทรานซิสเตอร์กำลัง

### เงื่อนไขของวงจรขั้วมอสเฟตกำลัง

ค่าความจุไฟฟ้า (Mosfet Capacitor) เนื่องจากโครงสร้างภายในตัวมอสเฟตกำลัง เหมือนมีตัวเก็บประจุต่ออยู่รอบๆ ขาตัวเก็บประจุจะทำให้มอสเฟตกำลังต้องเก็บประจุเข้าไปที่ตัวเก็บประจุก่อน เพื่อที่จะทำให้แรงดันที่ตกคร่อมขาเกต ( $V_{GS}$ ) มีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าแรงดันเริ่มทำงาน ส่วนในการที่จะทำให้มอสเฟตกำลังหยุดนำกระแส ก็จะต้องทำให้ตัวเก็บประจุคายประจุออกจนแรงดันตกคร่อมที่ขาเกต ลดลงต่ำกว่าแรงดันเริ่มทำงาน จึงเป็นผลให้มอสเฟตกำลังหยุดนำกระแส

ค่าความจุของตัวเก็บประจุที่อยู่ในตัวมอสเฟตกำลังนี้ จะเป็นตัวกำหนดความเร็วในการเปลี่ยนสถานะของตัวมอสเฟตกำลังเอง ดังนั้นการขั้วมอสเฟตกำลังให้นำกระแสได้นั้น จะต้องมีการเก็บประจุและคายประจุที่ขาเกต และต้องให้แรงดันตกคร่อมที่ขาเกตมีค่ามากพอ เพื่อที่มอสเฟตกำลังจะได้ทำงานเต็มประสิทธิภาพ

### 2.2.9 ไดโอดในแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซิง

เนื่องจากไดโอดอยู่ด้านเอาต์พุตจะต้องทำงานที่ความถี่สูง จึงเกิดกำลังงานสูญเสียทั้งขณะนำกระแสและขณะเปลี่ยนสถานะ ส่วนการใช้งานไดโอดที่ความถี่ต่ำๆ กำลังงานสูญเสียส่วนใหญ่เกิดขึ้นขณะนำกระแสเท่านั้น ดังที่เราทราบว่าคอนเวอร์เตอร์จะมีค่าความถี่ในการทำงานตั้งแต่ 20 kHz ขึ้นไป การเลือกใช้ชนิดของไดโอดจึงต้องมีคุณสมบัติดังนี้ มีแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสต่ำ มีช่วงเวลาดำเนินตัวสั้นและสามารถทนกำลังได้สูง ไดโอดที่ใช้งานในวงจรเรียงกระแสโดยทั่วไปไม่สามารถนำมาใช้กับคอนเวอร์เตอร์ เนื่องจากมีช่วงเวลาดำเนินตัวมาก ดังนั้นการเลือกใช้งานจากไดโอด 3 ชนิด คือ

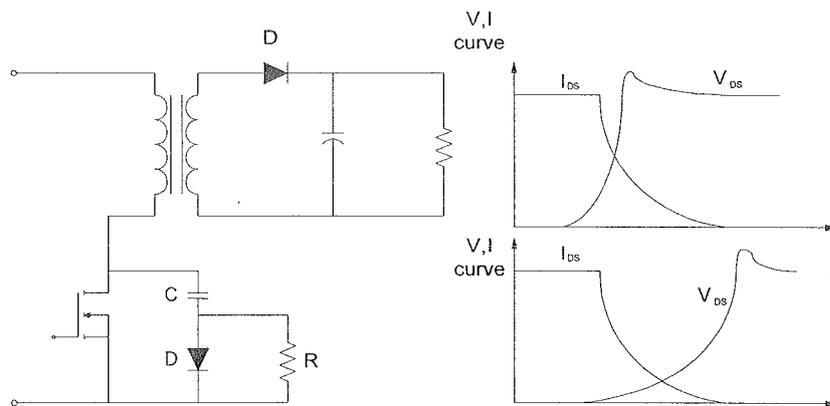
- Fast Recovery Diode
- Ultra Fast Recovery Diode
- Schottky Diode

## 2.3 วงจร snubber (Snubbers)

เป็นส่วนที่เพิ่มเติมเข้ามาในวงจรคอนเวอร์เตอร์เพื่อลดกำลังงานสูญเสียและป้องกันการเสียหายของสวิตช์กำลัง อาจแบ่งได้ 2 ลักษณะ วงจร snubber ช่วงหยุดนำกระแส และวงจร snubber ป้องกันแรงดันเกิน

### วงจร snubber ช่วงหยุดนำกระแส

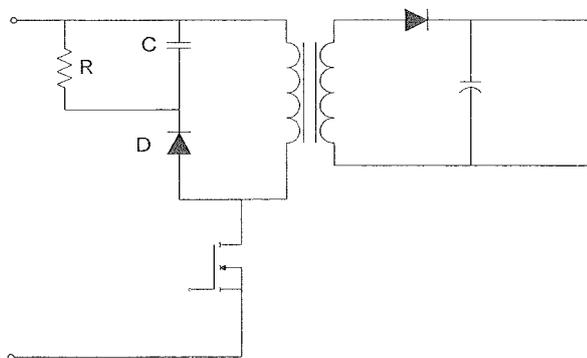
การใส่วงจร snubber เข้าไปในส่วนนี้ก็เพื่อลดการเกิดกำลังงานสูญเสีย ซึ่งจะควบคุมแรงดันที่ตกคร่อม drain และ source ให้เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนกระทั่งกระแสที่ไหลผ่านตัวสวิตช์กำลังนั้นลดลงได้ทันกัน ลักษณะการต่อวงจร ดังภาพประกอบที่ 2.12



ภาพประกอบที่ 2.12 วงจร snubber ช่วงหยุดนำกระแส

### วงจร snubber ป้องกันแรงดันเกิน

โดยทั่วไปการพังเสียหายของสวิตช์กำลังนั้น ส่วนมากมักจะมาจากการทำงานที่เกินพิกัดความปลอดภัย ซึ่ง spike voltage ขณะหยุดนำกระแส มักทำให้ค่าของแรงดันตกคร่อมสวิตช์กำลังขณะเริ่มหยุดนำกระแสมีค่าสูงจนเกินแรงดันสูงสุดที่ตัวมันจะทนได้ วงจรในส่วนนี้จะเป็วงจรที่ป้องกัน spike voltage ที่เกิดขึ้น ไม่ให้เกิดพิกัดความปลอดภัยของตัวสวิตช์กำลัง โดยมีลักษณะการต่อวงจร ดังภาพประกอบที่ 2.13



ภาพประกอบที่ 2.13 วงจร snubber ป้องกันแรงดันเกิน

## 2.4 ตัวควบคุมประมวลผลแบบฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic)

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาระบบการควบคุมแบบฟัซซี ซึ่งเป็นการควบคุมความไม่แน่นอนของเอาต์พุตเพื่อให้ระบบ ให้มีการทำงานตามต้องการ โดยการใช้ตัวประมวลผลของบริษัท Phillip รุ่น LPC2138 มีข้อเด่นทางฮาร์ดแวร์ไม่ว่าจะเป็น ดิจิตอลอินพุตพอร์ต อนาล็อกอินพุตพอร์ต วงจรตั้งเวลา ตัวนับ และส่วนเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ ตัวโปรแกรมที่ใช้เขียนโดยภาษาซี สิ่งที่ทำให้การควบคุมในวิจัยนี้คือเพื่อให้สามารถตอบสนองความต้องการของแรงดันด้านเอาต์พุตที่คงที่และมีค่าสมรรถนะในการควบคุมได้ ในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในค่าต่างๆ

ฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic) หรือ ตรรกศาสตร์คลุมเครือ เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์ (แบบ logic หรือตรรกศาสตร์) ผู้ให้กำเนิดทฤษฎีเกี่ยวกับฟัซซีลอจิกแบบที่ใช้กันอยู่ทั่วไป คือ ลอฟดี เอ. ซาดาคห์ เมื่อปี พ.ศ. 2508 ที่จะเชื่อมโยงระบบเกี่ยวกับการทำงานสองระบบที่แตกต่างกัน ในเรื่องความชัดเจน โดยที่ผลการคำนวณหรือวิธีการคำนวณ ไม่เป็นไปตามกฎทางคณิตศาสตร์กฎใดกฎหนึ่งเพียงอย่างเดียว ส่วนอีกระบบหนึ่งผลการคำนวณหรือวิธีการคำนวณ เป็นไปตามกฎทางคณิตศาสตร์กฎใดกฎหนึ่ง

ยังมีคำอธิบายความหมายอีกอย่างหนึ่งของฟัซซีลอจิก โดยเน้นระบบที่เหมาะสมสำหรับ ฟัซซีลอจิกหรือฟัซซีคอนโทรลคือ ฟัซซีลอจิกเป็น logic หรือ method ที่จะใช้จัดการกับระบบที่มีความแปรปรวนของกระบวนการสูง และผลที่ออกมาก็มีความไม่แน่นอนสูง ตัวอย่างที่ดีที่สุดสำหรับฟัซซีลอจิกก็คือสมองมนุษย์นั่นเอง ที่กระบวนการทำงานออกมาเป็นความคิดซับซ้อน ไม่คงเส้นคงวา หรือขึ้นอยู่กับปัจจัยอย่างใดอย่างหนึ่งคงที่ตลอดเวลา

เนื่องจากฟัซซีลอจิกเป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้จัดการปัญหาที่มีความไม่แน่นอนหรือความน่าจะเป็นอยู่ด้วย คณิตศาสตร์ที่ใช้จึงเป็นคณิตศาสตร์เกี่ยวกับ "ความน่าจะเป็น" คือ "probability" ตัวคณิตศาสตร์เองที่ใช้มากที่สุด คือ "Set" (เซต) หรือ "Set Theory" หรือ "Set Logic" ตรรกศาสตร์คลุมเครือนั้น สามารถระบุความเป็นสมาชิกของเซต ( set membership values ) ด้วยค่าระหว่าง 0 และ 1 ทำให้เกิดระดับกึ่งในลักษณะของ สีเทา นอกจาก ขาว และ ดำ ซึ่งมีประโยชน์ในการจำลอง ระดับซึ่งสามารถระบุด้วยคำพูด “ เล็กน้อย ” “ ค่อนข้าง ” “ มาก ” โดยใช้ค่าความเป็นสมาชิกของเซตบางส่วน ตรรกศาสตร์คลุมเครือนี้มีความสัมพันธ์กับ เซตวิภังค์ ( en : fuzzy set ) และ ทฤษฎีความเป็นไปได้ ( en : possibility theory ) โดยเป็นการใช้เหตุผลแบบประมาณ ซึ่งแตกต่างจากการใช้เหตุผลแบบเด็ดขาดในลักษณะ ถูก \ ผิด , ใช่ \ ไม่ใช่ ของตรรกศาสตร์แบบฉบับ ( Classical Logic ) ตรรกศาสตร์คลุมเครือนี้สามารถถือเป็นการประยุกต์ใช้งานเซตวิภังค์ เพื่อจำลองการตัดสินใจของผู้เชี่ยวชาญต่อปัญหาที่ซับซ้อน ค่าระดับความจริง ในตรรกศาสตร์คลุมเครือนี้มักจะสับสนกับ ค่าความน่าจะเป็น ซึ่งมีแนวความคิดที่แตกต่างกัน ค่าระดับความจริงคลุมเครือนี้ใช้ในการระบุ ค่าความเป็นสมาชิกของเซต แต่ความน่าจะเป็นนั้น ระบุความเป็นไปได้ของสภาพการณ์แต่ละรูปแบบที่อาจจะเกิดขึ้น

ตัวอย่างบทบาทของฟัซซีลอจิกที่ได้รับความสนใจมากเป็นพิเศษ คือ การพัฒนาคอมพิวเตอร์ให้เลียนแบบการคิดของมนุษย์ดังเช่น artificial intelligence (ปัญญาประดิษฐ์) และ expert system (ระบบหรือคอมพิวเตอร์ผู้เชี่ยวชาญ)

ฟัซซีลอจิก (fuzzy logic) พัฒนาจาก ทฤษฎีเซตวิภันนัย โดยเป็นการใช้เหตุผลแบบประมาณ ซึ่งแตกต่างจากการใช้เหตุผลแบบเด็ดขาดในลักษณะ ถูก/ผิด ใช่/ไม่ใช่ ของ ตรรกศาสตร์แบบฉบับ (classical logic) ตรรกศาสตร์คลุมเครือนั้นสามารถถือเป็นการประยุกต์ใช้งานเซตวิภันนัย เพื่อจำลองการตัดสินใจของผู้เชี่ยวชาญ ต่อปัญหาที่ซับซ้อน ซึ่งใช้ตัวเลขแทนตัวแปรที่เป็นภาษาพูดตามธรรมชาติที่คลุมเครือไม่ชัดเจนของมนุษย์ เนื่องจากฟัซซีลอจิกจัดการกับข้อมูล โดยประมาณอย่างเป็นระบบ ทำให้สามารถนำฟัซซีลอจิกมาใช้ควบคุมระบบนอนลิเนียร์ (non-linear หรือ ไม่เป็นเชิงเส้น) หรือจำลองระบบที่ซับซ้อน (complex system modeling) ได้อย่างง่ายดายและมีประสิทธิภาพ ซึ่งมีหลักการใช้โดยการลอกเลียนแบบความคิดของมนุษย์ โดยไม่เน้นแค่ ถูกหรือ ผิด เพียงอย่างเดียว และปัจจุบันได้มีการนำไปใช้ประโยชน์กับเทคโนโลยีต่างๆ มากมาย เป็นการประมวลผลของข้อมูลโดยใช้เฉพาะบางส่วนของสมาชิกภายในเซต โดยใช้หลักแนวคิดแบบเดียวกันกับมนุษย์ เช่น การแก้ไขปัญหา การตัดสินใจ แต่การทำงานจะทำให้การตัดสินใจนั้นรวดเร็วยิ่งขึ้น จะเป็นไปตามขั้นตอน คือ กำหนดวัตถุประสงค์ กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุต ใช้โครงสร้างพื้นฐาน โดยกำหนดปัญหาให้อยู่ในรูปของ X และ Y แล้ว Z แทนการใช้แบบจำลองระบบทางคณิตศาสตร์ สร้างสมาชิกของฟังก์ชันของตรรกศาสตร์คลุมเครือ สร้างลำดับของตรรกศาสตร์คลุมเครือ การทดสอบระบบการประเมินผลจนได้เป็นข้อสรุปที่มีการยอมรับ การประมวลผลของข้อมูลที่คล้ายคลึงกับการตัดสินใจของมนุษย์ แนวคิดที่มีความซับซ้อนมากกว่าถูกหรือผิดเพียงอย่างเดียว โดยการทำงานนั้นจะมีความสามารถมากยิ่งขึ้น ขึ้นอยู่กับ การปรับปรุงเปลี่ยนแปลงกฎและข้อสรุปที่ใช้

การประยุกต์ใช้งานตรรกศาสตร์คลุมเครือ โดยทั่วไปจะใช้ในการจำลองความรู้หรือประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญ โดยใช้เหตุผลหรือการตัดสินใจต่อสภาวะการณ์ต่างๆ ของมนุษย์นั้นสามารถเขียนอยู่ในรูปเชิงภาษาศาสตร์ของระบบกฎเกณฑ์ (Rule – Based system) คือ กฎเกณฑ์การพิจารณาเงื่อนไข IF (ถ้า) <เงื่อนไข> THEN (แล้ว) <ผลที่ตามมา> หรือ อยู่ในรูปอื่นที่เท่าเทียมกัน เช่น เมตริกซ์เปลี่ยนหมู่ฟัซซี (fuzzy associative matrices) เซตที่สร้างขึ้นนี้เรียกว่าเซตของความคลุมเครือ หรือ ฟัซซีเซต (Fuzzy Set) หรือ เซตวิภันนัย (ตามศัพท์บัญญัติของราชบัณฑิตยสถาน)

#### 2.4.1 นิยามพื้นฐานของฟัซซีเซต

ซัพพอร์ตของฟัซซีเซต (Support of fuzzy set) คือ คลิปเซตของสมาชิก x ในเอกภพสัมพัทธ์ ที่มีอัตราความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต มากกว่า 0 เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

$$\text{sup}(A) = \{x \in U / \mu_A(x) > 0\} \quad (2.16)$$

$A$  = ฟัซซีเซตใดๆ

$\text{Sup}(A)$  = ซัพพอร์ตของฟัซซีเซต  $A$

ฟัซซีซิงเกิลตัน (Fuzzy Singleton) คือ ซัพพอร์ตของฟัซซีเซตที่มีสมาชิกเพียงตัวเดียว

ศูนย์กลางของฟัซซี (Centre of fuzzy) คือ ค่ากึ่งกลางของฟัซซีเซต หรือค่าสูงสุดของฟังก์ชันการเป็นสมาชิก

จุดแบ่งของฟัซซีเซต (Crossover point of fuzzy set) คือ จุดใด ๆ ในเอกภพสัมพัทธ์ ที่มีอัตราความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0.5

ความสูงของฟัซซีเซต (Height of Fuzzy Set) คือ ค่าสูงสุดของฟังก์ชันการเป็นสมาชิก

$\alpha$  - cut เซตของฟัซซีเซต ( $\alpha$ -cut set of fuzzy set) คือ คลิปเซตของสมาชิก  $x$  ทั้งหมด ที่มีอัตราความเป็นสมาชิก มากกว่าหรือเท่ากับ  $\alpha$  เขียนแทนด้วย

$$A_\alpha = \{x \in U / \mu_A(x) \geq \alpha\} \quad (2.17)$$

#### 2.4.2 ตัวปฏิบัติการฟัซซี

การเท่ากันของฟัซซีเซต (Equality)

ฟัซซีเซต  $A$  และ  $B$  จะเท่ากันก็ต่อเมื่อ ฟัซซีเซตทั้งสองถูกนิยามบนเอกภพสัมพัทธ์เดียวกันและมีฟังก์ชันการเป็นสมาชิกเหมือนกัน นั่นคือ

$$\mu_A(x) = \mu_B(x) \quad \forall x \in U \quad (2.18)$$

การเป็นสับเซตของฟัซซีเซต (Contain)

ฟัซซีเซต  $A$  จะบรรจุอยู่ในฟัซซีเซต  $B$  ก็ต่อเมื่อ สมาชิก  $x$  ทุกตัวในเอกภพสัมพัทธ์  $U$  มีอัตราความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต  $A$  น้อยกว่าหรือ เท่ากับ อัตราความเป็นสมาชิกของเซต  $B$  เขียนแทนด้วย

$$A \subset B \quad \text{ก็ต่อเมื่อ} \quad \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad \forall x \in U \quad (2.19)$$

คอมพลีเมนต์ (complement)

คอมพลีเมนต์ของฟัซซีเซต  $A$  ที่มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิก  $\mu_A(x)$  เขียนแทนด้วย  $A'$  ถูกนิยามดังนี้

$$\mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (2.20)$$

ยูเนียน (Union)

ถ้า  $A$  และ  $B$  เป็นฟัซซีเซตใน  $U$  การรวมสมาชิกทั้งหมดของทั้ง 2 เซต จะเขียนได้เป็น

$A \cup B$  โดย

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (2.21)$$

อินเตอร์เซกชัน ( Intersection )

ถ้า A และ B เป็นฟัซซีเซตใน U การรวมสมาชิกที่เป็นสมาชิกทั้ง 2 เซต จะเขียนได้เป็น

$$A \cap B \text{ โดย } \mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (2.22)$$

กฎของดีมอแกนต์ (Demorgan's law)

กฎของดีมอแกนต์ กล่าวว่า คอมพลิเมนต์ของฟัซซีเซตสองเซตที่อยู่เนี่ยกันจะสมมูลกับการอินเตอร์เซกชันกันระหว่างคอมพลิเมนต์ของแต่ละฟัซซีเซตซึ่งเขียนแทนได้ด้วย

$$\overline{A \cup B} = \overline{A} \cap \overline{B} \quad (2.23)$$

S - Norm (Triangular co-norms)

$$\text{ให้ } S : [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$$

เป็นการถ่ายโอนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต A และ B ค่าความเป็นสมาชิกจะเป็นการยูเนียน ระหว่าง A และ B สามารถเขียนได้เป็น

$$S[\mu_A(x), \mu_B(x)] = \mu_{A \cup B}(x) \quad (2.24)$$

ซึ่งสามารถจะแยกได้เป็น 4 เงื่อนไข

1) Boundary condition

$$S(1,1) = 1, S(0,a) = S(a,0) = a$$

2) Commutative condition

$$S(a,b) = S(b,a)$$

3) Nondecreasing condition

$$S(a,b) \leq S(a',b')$$

เมื่อ  $a \leq a'$  และ  $b \leq b'$

4) Associative condition

$$S(S(a,b),c) = S(a,S(b,c))$$

T - Norm (Triangular norms)

$$\text{ให้ } t : [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$$

เป็นการถ่ายโอนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต A และ B ค่าความเป็นสมาชิกจะเป็นการอินเตอร์เซกชันระหว่าง A และ B สามารถเขียนได้เป็น

$$t[\mu_A(x), \mu_B(x)] = \mu_{A \cap B}(x) \quad (2.25)$$

แบ่งออกเป็น 4 เงื่อนไขดังนี้

1) Boundary condition

$$t(0,0) = 0, t(a,1) = t(1,a) = 0$$

2) Commutative condition

$$t(a, b) = t(b, a)$$

3) Nondecreasing condition

$$t(a, b) \leq t(a', b')$$

เมื่อ  $a \leq a'$  และ  $b \leq b'$

4) Associativity

$$t(t(a, b), c) = t(a, t(b, c))$$

### 2.4.3 ความสัมพันธ์ของฟัซซี (Fuzzy Relation)

ความสัมพันธ์ของฟัซซี (Fuzzy Relation) หมายถึง ความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันความเป็นสมาชิก 2 คู่ขึ้นไป โดยมีอัตราความเป็นสมาชิกหรือ Degree of Membership อยู่ในช่วง 0 - 1 โดยกำหนดคำนิยามดังนี้

ถ้า  $U$  และ  $V$  เป็นเอกภพสัมพัทธ์ต่อเนื่องนับไม่ได้ (Uncountable continuous universes) และ  $\mu_R: U \times V \rightarrow [0,1]$  จะได้ว่า

$$R = \int_{U \times V} \mu_R(u, v) / (u, v) \quad (2.26)$$

$(u, v)$  คือ คู่อันดับใดๆ ในเซตของผลคูณคาร์ทีเซียน  $U \times V$  โดยที่  $u \in U$  และ  $v \in V$

$R$  คือ ความสัมพันธ์ของฟัซซี

สัญลักษณ์ อินทิกรัล แทน เซตของ  $\mu_R(u, v) / (u, v)$  ทั้งหมด ใน  $U \times V$

ถ้า  $U$  และ  $V$  เป็นเอกภพสัมพัทธ์เชิงจำนวนนับได้ (countable discret universe)

โดยที่  $\mu_R(u, v) = \mu_{U \times V}(u, v) = \min(\mu_U(u), \mu_V(v))$

#### 2.4.3.1 การปฏิบัติการบนความสัมพันธ์ฟัซซี (Operation on Fuzzy Relation)

การอินเตอร์เซกชันของความสัมพันธ์ (intersection of fuzzy relation)

ถ้า  $R$  และ  $S$  เป็นความสัมพันธ์แบบฟัซซีบน  $X \times Y$  อินเตอร์เซกชันของ  $R$  และ  $S$  กำหนดได้เป็น

$$\forall (x, y) \in X \times Y: \mu_{R \cap S}(x, y) = \min(\mu_R(x, y), \mu_S(x, y)) \quad (2.27)$$

การปฏิบัติการ  $\min$  อาจเรียกว่า “T-norm”

การยูเนียนของความสัมพันธ์ (Union of fuzzy relation)

การยูเนียนของ  $R$  และ  $S$  กำหนดได้เป็น

$$\forall (x, y) \in X \times Y: \mu_{R \cup S}(x, y) = \max(\mu_R(x, y), \mu_S(x, y)) \quad (2.28)$$

การปฏิบัติการ max อาจเรียกว่า “S-norm”

**โพรเจกชันของ R บน Y**

กำหนดได้เป็น ถ้า R เป็นความสัมพันธ์ฟัซซีบน  $X \times Y$  เมื่อ X, Y เป็นค่าต่อเนื่อง

$$\text{proj}_{R \text{ on } Y} = \int_Y \sup_X \mu_R(x, y) / y \quad (2.29)$$

ถ้า X, Y เป็นค่าจำนวน (discrete domain) ให้ใช้ตัวปฏิบัติการ MAX แทน supremum

**Total Projection บนความสัมพันธ์ R**

กำหนดให้ R เป็นความสัมพันธ์แบบฟัซซี บน  $X \times Y$  total projection บน R คือ อัตราความเป็นสมาชิกสูงสุดของความสัมพันธ์ R

$$\begin{aligned} R &= \{[(x, y), \mu_R(x, y)] / (x, y) \in X \times Y\} \\ \text{proj}_{R \text{ on } X} &= \{(x, \max_Y \mu_R(x, y)) / (x, y) \in X \times Y\} \\ \text{proj}_{R \text{ on } Y} &= \{(y, \max_X \mu_R(x, y)) / (x, y) \in X \times Y\} \\ \text{total.proj} &= \max_X \max_Y \{\mu_R(x, y) / (x, y) \in X \times Y\} \end{aligned} \quad (2.30)$$

#### 2.4.3.2 การคอมโพสิชันของความสัมพันธ์ฟัซซี (Composition of Fuzzy Relation)

ให้ A เป็นฟัซซีบนเอกภพสัมพัทธ์ X

R เป็นความสัมพันธ์ฟัซซี

$$R = X \times Y$$

คอมโพสิชันของ A และ R เท่ากับ B บนเอกภพสัมพัทธ์ Y หมายถึง

$$B = A \circ R = \text{proj}(\text{ce}(A) \cap R) \quad (2.31)$$

- Max-Min composition

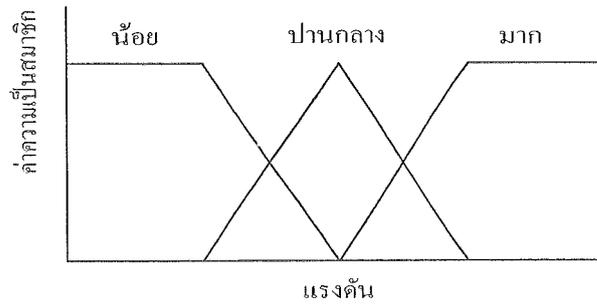
$$\mu_B(y) = \max_X \min(\mu_A(x), \mu_R(x, y)) \quad (2.32)$$

- Max-product composition

$$\mu_B(y) = \max_X (\mu_A(x) \mu_R(x, y)) \quad (2.33)$$

#### 2.4.4 ตัวแปรลึงค์จีสติก (Linguistic Variable)

หมายถึง ตัวแปรที่กำหนดย่านหรือขนาดปริมาณ ที่สามารถกำหนดเป็นภาษามนุษย์ เช่น “อากาศร้อน” “อุณหภูมิสูง” “รถมีความเร็วสูง” หรือ “ค่าแรงคืน” เป็นต้น โดยปริมาณเหล่านี้จะใช้เป็นตัวกำหนดชื่อของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟัซซี ดังภาพประกอบที่ 2.14



ภาพประกอบที่ 2.14 แสดง linguistic variable กำหนดย่านค่าแรงดัน

#### 2.4.4.1 การกำหนดคุณสมบัติของตัวแปรลึกลับ

การกำหนดคุณสมบัติของตัวแปร จะใช้เป็น (X, T, U, M)

X = ปริมาณ หรือตัวแปรทางฟิสิกส์ที่ใช้แทน เช่น แรงดัน เป็นต้น

T = เซตของตัวแปรทั้งหมดของตัวแปร X เช่น { น้อย ปานกลาง และ มาก }

U = เอกภพสัมพัทธ์ของ X เช่น  $[0, V_{MAX}]$

M = ความสัมพันธ์ของ T แต่ละค่า

ค่า linguistic variable นี้ ถือว่าเป็นสิ่งสำคัญและการจำแนกปริมาณทางฟิสิกส์ โดยความรู้สึกของมนุษย์หรือประสบการณ์จากผู้เชี่ยวชาญ เพื่อที่จะนำไปประเมินผลจากเหตุการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นแล้วในอดีต

#### 2.4.4.2 ขอบเขตของตัวแปรลึกลับ (Linguistic Hedges)

การกำหนดย่านและ linguistic hedges นอกจากจะกำหนดเป็นระดับของแรงดัน แล้วแต่ละตัวแปรยังสามารถขยาย หรือเพิ่มลดระดับจากความรู้สึกได้ เช่น “น้อย” “ปานกลาง” “มาก” โดยทั่วไปเราจะกำหนดระดับของตัวแปรได้ 3 ระดับ

- 1) ตัวแปรหลัก เช่น “น้อย” “ปานกลาง” “มาก”
- 2) คำตรงข้าม เช่น “ไม่..” “หรือ” “และ”
- 3) ขอบเขต เช่น “แรงดันน้อย” “แรงดันค่อนข้างมาก”

การกำหนดขอบเขต อาจกำหนดค่าของความเป็นสมาชิก ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \mu_{\text{veryA}}(x) &= [\mu_A(x)]^2 \\ \mu_{\text{lessA}}(x) &= [\mu_A(x)]^{1/2} \end{aligned} \quad (2.34)$$

#### 2.4.5 กฎของฟัซซี (Fuzzy Rule)

ในระบบของฟัซซี จะเป็นการสรุปจากเหตุ และผลตามฐานความรู้ของมนุษย์ ซึ่งเราจะกำหนดให้อยู่ใน รูปของ IF - THEN เช่น

IF <fuzzy proposition>, THEN <fuzzy proposition>

### 2.4.6 ประพจน์แบบฟัซซี (Fuzzy Proposition)

ประพจน์หมายถึงการกล่าวถึงความจริงทางคุณสมบัติ หรือค่าปริมาณของวัตถุใด หรือ ตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งประพจน์แบบฟัซซีจะแบ่งได้เป็น 2 ชนิด

2.4.6.1 ประพจน์เดี่ยว หมายถึงการบอกคุณสมบัติของตัวแปรค่าเดียวโดยกำหนดตัวแปรนี้ให้เป็น linguistic เช่น กำหนดให้

X เป็น linguistic variable ของความเร็ว

S, M, F เป็น linguistic variable จำแนกย่านของความเร็วออกเป็น Slow , Medium , Fast ตามลำดับ เขียนได้ว่า

X IS S

X IS M

X IS F เป็นต้น

2.4.6.2 ประพจน์แบบผสม หมายถึงการรวมประพจน์เดี่ยว 2 ประพจน์หรือมากกว่าโดยเชื่อมด้วยตัวปฏิบัติการ “AND”, “OR” หรือ “NOT” เชื่อมเพื่อใช้ในการสรุปเหตุและผล เช่น

X IS S OR X IS NOT M

ลักษณะการเชื่อมด้วยตัวปฏิบัติการ จะแบ่งได้หลายชนิด ถ้ากำหนดให้ X และ Y เป็นตัวแปรถึงจัสติก อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ U และ V ตามลำดับ A และ B เป็นฟัซซีเซต

- การเชื่อมด้วย “AND”

X IS A AND Y IS B

หรือเขียนได้

$$\mu_{A \cap B}(x, y) = \min[\mu_A(x), \mu_B(y)]$$

- การเชื่อมด้วย “OR”

X IS A OR Y IS B

หรือเขียนได้

$$\mu_{A \cup B}(x, y) = \max[\mu_A(x), \mu_B(y)]$$

### 2.4.7 ตัวควบคุมฟัซซี (Fuzzy Controller)

ตัวควบคุมฟัซซีที่กล่าวนี้เป็นตัวควบคุมแบบใช้ฐานความรู้ (knowledge base) หรือประสบการณ์จากผู้เชี่ยวชาญ เป็นกฎหรือแนวทางในการควบคุมเราจะเรียกตัวควบคุม ได้อีกชื่อหนึ่งว่า “ตัวควบคุมฟัซซีแบบ ฐานความรู้” (Fuzzy Knowledge Base Controller) ใช้คำย่อว่า FKBC

#### 2.4.7.1 โครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซีแบบฐานความรู้ (FKBC)

โครงสร้างของ FKBC จะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วน ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.15

- 1) ฟัชซีฟิเคชัน โมดูล (Fuzzification Module)
- 2) ฐานความรู้ (Knowledge Base)
- 3) กลไกการอนุมาน (Inference Engine)
- 4) ดีฟัซซีฟิเคชัน โมดูล (Defuzzification Module)

#### 2.4.7.2 ฟัชซีฟิเคชันโมดูล

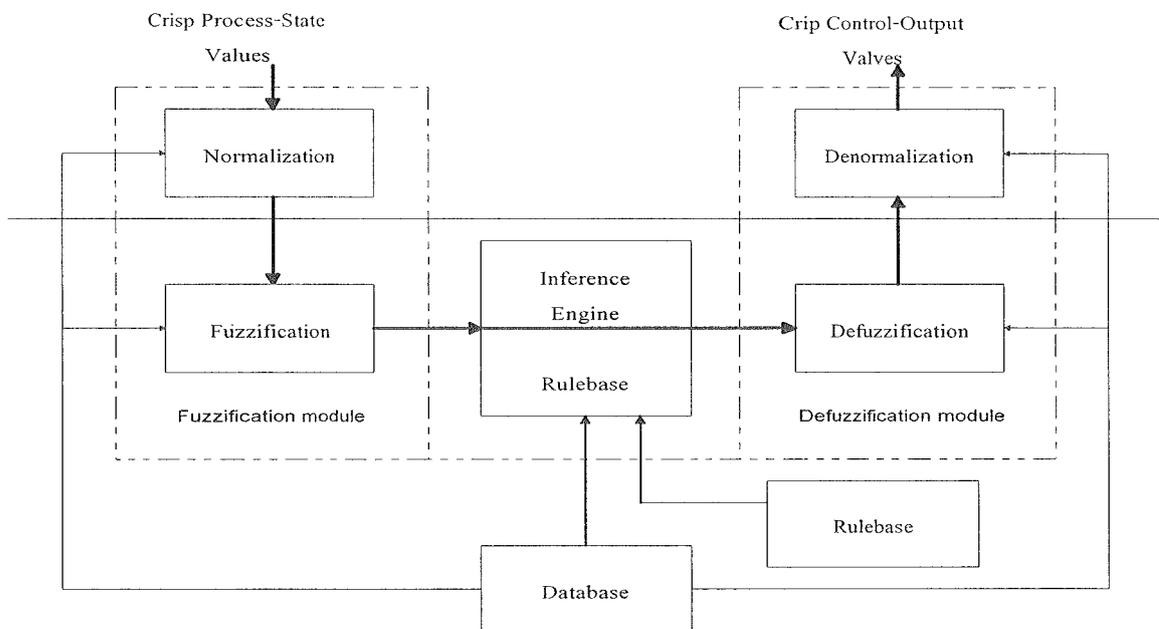
แบ่งออกเป็น 2 ส่วน

- 1) นอเมอร์ไรซ์เซชัน (Normalization) เป็นส่วนที่ใช้เปลี่ยนสเกลของตัวแปรอินพุตหรือคลิป์เซตให้อยู่ในสเกลของเอกภพสัมพัทธ์ของย่านการควบคุม
- 2) ฟัชซีฟิเคชัน (Fuzzification) เป็นส่วนที่ใช้แปลงปริมาณของคลิป์เซตที่ผ่านการนอเมอร์ไรซ์แล้วให้เป็น ค่าความเป็นสมาชิก ของฟัชซีเซต โดยมีย่านอยู่ระหว่าง  $[0,1]$

#### 2.4.7.3 ฐานความรู้

ส่วนประกอบของฐานความรู้จะประกอบด้วย

- ฐานข้อมูล (Data Base) เป็นที่เก็บของข้อมูลต่าง ๆ ที่ใช้ในส่วนประกอบของตัวควบคุมฟัชซี เช่น ค่าคงที่ของส่วนฟัชซีฟิเคชัน โมดูล, กฎ, ดีฟัซซีฟิเคชัน โมดูล, ค่าสเกลเฟลคเตอร์, ฟังก์ชันต่าง ๆ



ภาพประกอบที่ 2.15 แสดงโครงสร้างของตัวควบคุมฟัชซีแบบฐานความรู้

- ฐานกฎ (Rules Base) เป็นที่เก็บของกฎการควบคุมอาจจะอยู่ในรูปของ IF\_THEN หรือเป็นตารางความสัมพันธ์ฟัชซี แนวทางในการออกแบบฐานกฎ จะใช้กลไกการอนุมาน และจากพฤติกรรมการตอบสนองของระบบที่จะควบคุม ซึ่งจะกล่าวต่อไป

### 2.4.7.4 กลไกการอนุมาน

กลไกการอนุมานมีหน้าที่สรุปผล (consequent) จากเหตุ (antecedent) และเงื่อนไขโดยทั่วไป การเชื่อมโยงของเหตุผลจะมี 2 ชนิดคือ

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

รูปแบบของทั้ง 2 วิธีมีดังนี้

1) GMP:

Premise : x is A'  
 implication : if x is A then y is B  
 consequence : y is B'

2) GMT:

Premise : y is B'  
 implication : if x is A then y is B  
 consequence : x is A'



โดย

- $A, A', B, B'$  = เป็นฟัซซีเซต
- $x, y$  = ตัวแปรลิ่งค์จิสติก
- $\mu_R(x,y)$  = ค่าความเป็นสมาชิกของความสัมพันธ์ของ A และ B
- $\mu_A(x), \mu_B(y)$  = ค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปร  $x, y$
- $f_{imp}$  = ฟังก์ชันการอิมพลีเคชัน (implication) หรือฟังก์ชันการเชื่อมโยงค่าความเป็นสมาชิกของความสัมพันธ์ฟัซซี

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

โดยทั่วไป ในการสร้างตัวควบคุมฟัซซีจะนิยมใช้การเชื่อมโยง แบบ GMP และใช้  $f_{imp}$  ด้วยวิธี Mamdani 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  $C_2$

กำหนดให้

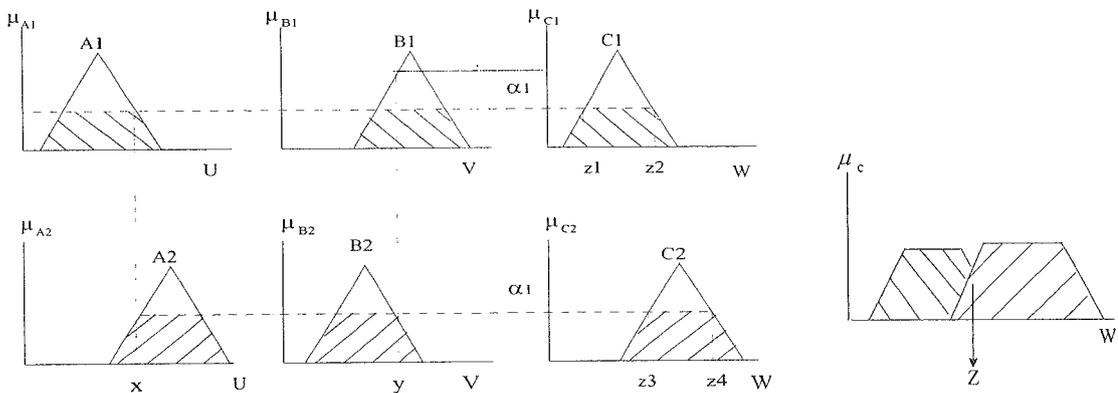
- $A_1, B_1, A_2, B_2$  = ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอินพุต
- $C_1, C_2$  = ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเอาต์พุต

- $R_1, R_2$  = กฎความสัมพันธ์ฟัซซี
- $z$  = ตัวแปรลึกลับในเอกภพสัมพัทธ์ U, V, W ตามลำดับ
- $\alpha_1, \alpha_2$  = ระดับความเป็นสมาชิกของ 2 อินพุต (fire strength)

จะได้ค่าความเป็นสมาชิกของผลสรุป ( $\mu_c$ )

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \min(\mu_{A1}(x_0), \mu_{B1}(y_0)) \\ \alpha_2 &= \min(\mu_{B1}(x_0), \mu_{B1}(y_0)) \\ \mu_{c1}(z) &= \min(\alpha_1, \mu_c(z)) \\ \mu_c(z) &= \max(\mu_{c1}, \mu_{c2}) \end{aligned}$$

จากผลของการหาค่า ระดับความเป็นสมาชิก สามารถทำการอนุมานได้ ในที่นี้จะแสดงการอนุมานในแบบของ Mamdani ดังภาพประกอบที่ 2.16



ภาพประกอบที่ 2.16 การอนุมานโดยวิธีของ Mamdani

#### 2.4.7.5 คีฟัซซีฟิเคชั่นโมดูล

แบ่งออกเป็น 2 ส่วน

1) คีฟัซซีฟิเคชั่น ทำหน้าที่แปลงค่าความเป็นสมาชิกที่ได้จากกลไกการประเมิน กลับมาเป็นค่าเซต เพื่อใช้เป็นค่าที่นำไปควบคุมต่อไป วิธีการคีฟัซซีฟิเคชั่นที่นิยมใช้ในตัวควบคุมฟัซซี คือวิธี Center of Gravity (COG.)

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_c(z) * z_i}{\sum_{i=1}^n \mu_c(z_i)} \quad (2.36)$$

- $z_0$  = ตัวแปรเอาต์พุตอยู่ในรูปของคลิพเซต
- $z_i$  = ตัวแปรเอาต์พุตที่ได้แต่ละกฎ
- $i$  = จำนวนกฎที่ถูกประเมิน
- $\mu_c(z_i)$  = ค่าความเป็นสมาชิกที่ได้จากการประเมิน

## 2) ดีนอร์มอลไรเซชัน (Denormalization)

เป็นส่วนที่แปลงค่าสเกลของตัวแปรเอาต์พุตจากคิฟิซซิฟิเคชัน ให้อยู่ในย่านของปริมาณที่ใช้ควบคุมจริง

### 2.4.8 การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในตัวควบคุมพีซซี

ตัวควบคุมพีซซีที่นิยมใช้จะมีชนิดต่าง ๆ คล้ายกับการควบคุมแบบดั้งเดิม เช่น แบบ P, PD, PI, PID เป็นต้น การกำหนดตัวแปรอินพุต และตัวแปรเอาต์พุตจะสอดคล้องกับรูปแบบของตัวควบคุม และเพื่อไปใช้เป็นตัวแปรในส่วนเหตุและผลสรุปของกฎ การกำหนดตัวแปร กำหนดได้ดังนี้ [7]

ตัวแปรอินพุต  $e$  = ค่าผิดพลาดระหว่างค่าอ้างอิงและค่าที่ได้จริง (error)

$ce$  = ค่าผิดพลาดในรอบปัจจุบันกับรอบที่ผ่านมา (change error)

$\delta e$  = ผลรวมของค่าผิดพลาด

ตัวแปรเอาต์พุต  $u$  = ตัวแปรเอาต์พุตซึ่งเป็นผลลัพธ์ของตัวควบคุม

$du$  = อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าเอาต์พุต

$$\text{จะหาค่าตัวแปรได้จาก } e(k) = y_{sp} - y(k) \quad (2.37)$$

$$ce(k) = e(k) - e(k-1) \quad (2.38)$$

$$du(k) = u(k) - u(k-1) \quad (2.39)$$

กำหนดให้

$$y_{sp} = \text{ค่าเอาต์พุตของกระบวนการที่ออกแบบ}$$

$$y(k) = \text{ค่าเอาต์พุตของกระบวนการจริง}$$

$$k = \text{จำนวนรอบของการทำงาน}$$

### 2.4.9 ชนิดของตัวควบคุมพีซซีแบบฐานความรู้ (Type of FKBC)

การแบ่งชนิดของตัวควบคุมพีซซีจะอ้างอิงถึงคุณสมบัติเดิมของการควบคุมแบบคอนเวร์ชันเนล โดยการควบคุมแบบพีซซี จะกำหนดความสัมพันธ์จากกฎ และประเมินแบบ GMP จากเหตุเพื่อให้ได้ ผลสรุปกำหนดให้ส่วนของเหตุและผลสรุปจะอยู่ในรูปของตัวแปรลิงค์จิสติก

#### 2.4.9.1 ตัวควบคุมแบบ Proportional (P)

จากสมการ

$$u = K_p \cdot e \quad (2.40)$$

โดย  $K_p$  = Proportional gain

แสดงในรูปกฎของพีชชี

if  $e(k)$  is (antecedent) then  $u(k)$  is (consequent)

#### 2.4.9.2 ตัวควบคุมแบบ Proportional-Derivative (PD)

จากสมการ

$$u = K_p \cdot e + K_d \cdot \dot{e} \quad (2.41)$$

โดย  $K_p$  = proportional gain

$K_d$  = derivative gain

แสดงในรูปกฎของพีชชี

if  $e(k)$  is (antecedent) and  $\dot{e}(k)$  is (antecedent) then  $u(k)$  is (consequent)

#### 2.4.9.3 ตัวควบคุมแบบ Proportional-Integral (PI)

จากสมการ

$$u = K_p \cdot e + K_I \cdot \int e dt \quad (2.42)$$

$$D u = K_p \cdot \dot{e} + K_I \cdot e \quad (2.43)$$

โดย  $K_I$  = intergral gain

แสดงในรูปกฎของพีชชี

if  $e(k)$  is (antecedent) and  $\int e(k)$  is (antecedent) then  $\Delta u(k)$  is (consequent)

#### 2.4.9.4 ตัวควบคุมแบบ Proportional-Integral-derivative (PID)

จากสมการ

$$u = K_p \cdot e + K_d \cdot \dot{e} + K_I \cdot \int e dt \quad (2.44)$$

กำหนด  $\Delta e$  = ผลรวมของค่าผิดพลาด

$$\Delta e = \sum_{i=1}^{k-1} e(i) \quad (2.45)$$

แสดงด้วยกฎของพีชชี

if  $e(k)$  is (antecedent) and  $\Delta e(k)$  is (antecedent) and  $\int e$  is (antecedent) then  $u(k)$  is (consequent)

#### 2.4.10 การกำหนดฐานข้อมูลของตัวควบคุมพีชชี

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ตัวควบคุมพีชชีจะประกอบด้วยฐานข้อมูล ซึ่งเป็นที่เก็บของฟังก์ชันการเป็นสมาชิก สเกลของส่วนอินพุตและเอาต์พุตในหัวข้อนี้ เราจะกล่าวถึงรายละเอียดของการกำหนดฟังก์ชันและสเกลต่าง ๆ

##### 2.4.10.1 การกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

ในการกำหนดค่าความเป็นสมาชิกของพีชชีเซต เราอาจจะกำหนดได้ 2 แบบ คือ

- 1) แบบตัวเลข หมายถึง การแสดงอัตราของความเป็นสมาชิกเชิงตัวเลขในเอกภพสัมพัทธ์
- 2) แบบแสดงเป็นฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ในที่นี้จะขอกว่าในแบบของฟังก์ชัน โดยที่ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจะจำแนกระดับของค่าฟังก์ชันสถิต ในเอกภพสัมพัทธ์ เพื่อทำหน้าที่แปลงปริมาณอินพุตที่อยู่ในรูปของคลิบเซตให้อยู่ในโดเมนของฟัซซีเซต ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่นิยมใช้จะมีหลายชนิด เช่น s-ฟังก์ชัน,  $\pi$ -ฟังก์ชัน, ฟังก์ชันเหลี่ยม, Trapezoid function และ เอ็กซ์โปเนนเชียลฟังก์ชัน เป็นต้น

หลักเกณฑ์ในการกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

2.1) การกระจายของข้อมูลหรือคุณลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างอินพุต และเอาต์พุต ของกระบวนการที่ควบคุมว่าเป็นสมาชิกเชิงเส้นหรือไม่เป็นเชิงเส้น ถ้าเป็นเชิงเส้นควรใช้ฟังก์ชันสามเหลี่ยม ถ้าไม่เป็นเชิงเส้นควรใช้แบบเอ็กซ์โปเนนเชียล

2.2) คุณสมบัติในการคำนวณ เช่นความเร็วในการคำนวณขนาดของหน่วยความจำ

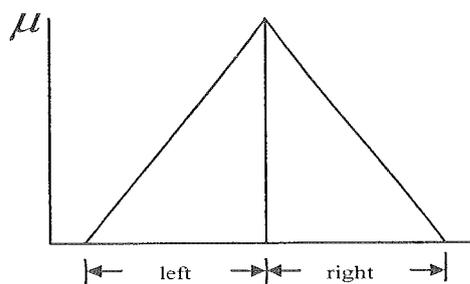
2.3) ความต่อเนื่อง และไม่ต่อเนื่องของข้อมูล โดยทั่วไปจำนวนฟังก์ชันที่ใช้กำหนดระดับ ของค่าฟังก์ชันสถิตควร ไม่ต่ำกว่า 5 ถึง 7 ระดับ ถ้าต่ำกว่านี้จะเกิดความไม่ต่อเนื่อง และเกิดความผิดพลาดในผลลัพธ์ ถ้ามีจำนวนมากกว่านี้ จะทำให้เพิ่มเวลาการคำนวณให้มากขึ้น

2.4) การกำหนดฟังก์ชัน แต่ละฟังก์ชันควรมีการทับกันระหว่างฟังก์ชัน (overlap) ของ เซตที่อยู่ติดกัน เพื่อให้แน่ใจว่าการควบคุมต้องมีกฎควบคุมอย่างน้อย 1-2 กฎ ในการรองรับตัวแปรอินพุตเปอร์เซ็นต์การทับกันจะอยู่ที่ประมาณ 15-50 %

2.5) การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

- ค่าสูงสุด (Peak Value) หมายถึง ค่าสูงสุดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกในแต่ละเทอมจะต้องมีค่าเท่ากับ 1

- ความกว้างทางซ้าย และขวา (Left and Right Width) หมายถึง ช่วงของความกว้างระหว่างจุดสูงสุด และจุดศูนย์ของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก หรือเรียกว่า ซัพพอร์ตของค่าสมาชิก ทั้งซ้าย และขวา ถ้าความกว้างทั้งสองเท่ากัน เราเรียกว่าฟังก์ชันนี้เป็นฟังก์ชันสมมาตร ดังภาพประกอบที่ 2.17



ภาพประกอบที่ 2.17 แสดงฟังก์ชันสมมาตร

- จุดตัด (Crosspoints) จุดที่ฟังก์ชัน 2 ฟังก์ชันที่อยู่ใกล้เคียงกันตัดกัน จากภาพประกอบที่ 2.18

กำหนดให้

$x$  เท่ากับจุดตัด

$d_1$  เท่ากับความกว้างระหว่างจุดเริ่มต้นและจุดตัดของฟังก์ชันที่ 1.

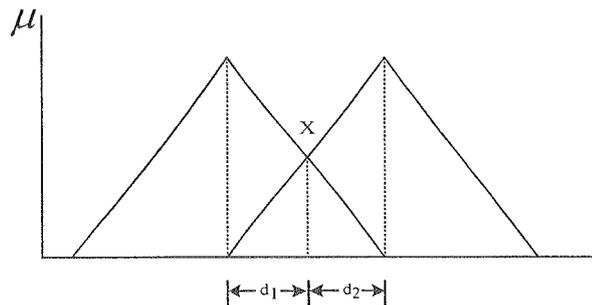
$d_2$  เท่ากับความกว้างระหว่างจุดเริ่มต้นและจุดตัดของฟังก์ชันที่ 2.

ระดับของจุดตัด (Cross-point level) เท่ากับ ระยะระหว่างจุดตัดถึงแกน  $x$

อัตราส่วนของจุดตัด (Cross-point ratio) เท่ากับ  $d_1/d_2$

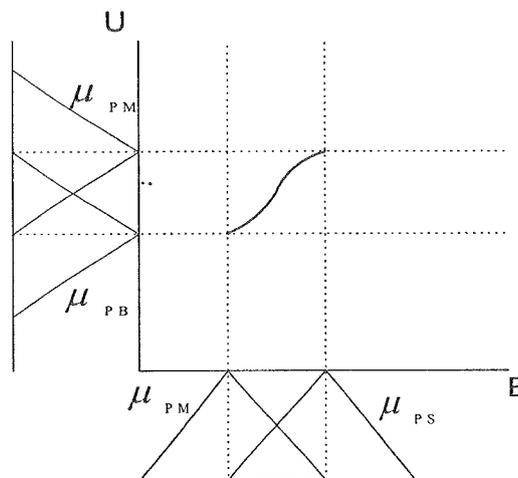
ในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบที่เป็นเชิงเส้นการใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสมมาตร มีระดับของจุดตัดเท่ากับ 0.5 และมีอัตราส่วนจุดตัดเท่ากับ 1 จะทำให้มีค่าสมรรถนะของระบบดีคืออมจุดพุ่งเกิน (overshoot) ต่ำ เวลาการเข้าถึง (Rise Time) เร็ว

ในส่วนของความต่อเนื่องของการควบคุม ควรจะให้ระยะ  $d_1$  และ  $d_2$  ของทั้งสองฟังก์ชัน ที่ใกล้กันมีระยะเท่ากัน และที่ตำแหน่งศูนย์ของค่าความเป็นสมาชิกของทั้งสองฟังก์ชัน จะตรงกับ ตำแหน่งที่เป็นค่าสูงสุดพอดี ดังภาพประกอบที่ 2.18



ภาพประกอบที่ 2.18 แสดงความกว้างของจุดตัดของทั้งสองฟังก์ชัน

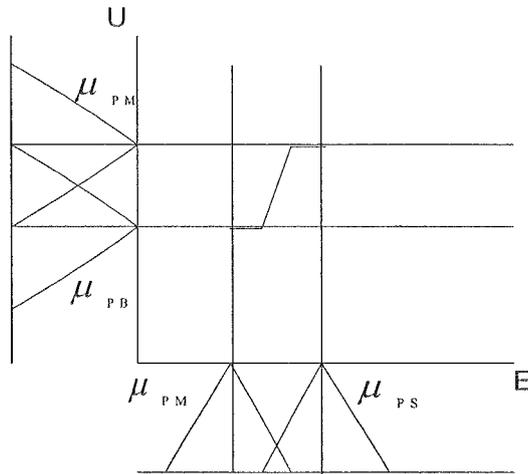
จะเห็นความต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง (จากภาพประกอบที่ 2.19, 2.20) ของค่าเอาต์พุต จากการกำหนดระยะของจุดตัดและความกว้างทางซ้าย และทางขวาของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก



ภาพประกอบที่ 2.19 แสดงความต่อเนื่องของเอาต์พุต

### 2.4.10.2 การกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเชิงตัวเลข

การกำหนดฟังก์ชันเชิงตัวเลขในโดเมนที่ต่อเนื่อง หมายถึงการแบ่งย่านในเอกภพสัมพัทธ์ ออกเป็นเซกเมนต์ เราเรียกว่า “การควอนไทซ์เซชัน (quantization)” และกำหนดคิกริค่าฟังก์ชันค่าเชิงตัวเลข แต่ละค่าเป็นตัวเลข การกำหนดฟังก์ชันวิธีนี้ การกำหนดระดับของการควอนไทซ์จะมีผลต่อการ ควบคุมแบบ หยาบ และควบคุมแบบละเอียด ถ้าให้ระดับมากจะมีผลให้ค่าเอาต์พุตละเอียด แต่จะใช้ เวลานานขึ้น และจะต้องใช้หน่วยความจำมากขึ้น



ภาพประกอบที่ 2.20 แสดงความไม่ต่อเนื่องของเอาต์พุต

### 2.4.11 ฐานของกฎ

กฎ เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการควบคุมแบบฟัซซี กฎจะเป็นส่วนที่โยงถึงความ สัมพันธ์ ของตัวแปรฟังก์ชันเชิงตัวเลข ในส่วนของอินพุตและเอาต์พุต ใช้ในการประเมินผลลัพธ์ ของฟัซซีรูปแบบของ ฐานกฎที่นิยมใช้ แบ่งเป็น 2 ชนิด

1) ระบบที่มี 1 อินพุต 1 เอาต์พุต จะอยู่ในรูป

กฎที่ 1 : IF x is A1 THEN y is B1

กฎที่ 2 : IF x is A2 THEN y is B2

กฎที่ N : IF x is AN THEN y is BN

โดยให้ x = ตัวแปรฟังก์ชันเชิงตัวเลขของอินพุต

y = ตัวแปรฟังก์ชันเชิงตัวเลขของเอาต์พุต

A1, B1 = ฟังก์ชันเชิงตัวเลขฟังก์ชัน หรือ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอินพุต และ

เอาต์พุตตามลำดับ

N = จำนวนกฎ

จำนวน N จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบ แต่โดยทั่วไปจะใช้จำนวนกฎเท่ากับ ฟังก์ชัน ความเป็นสมาชิก

2) ระบบที่มี 2 อินพุต 1 เอาต์พุต จะอยู่ในรูป

กฎที่ 1 : IF x is A1 AND y is B1 THEN z is C1

กฎที่ 2 : IF x is A2 AND y is B2 THEN z is C2

กฎที่ N : IF x is AN AND y is BN THEN z is CN

#### 2.4.11.1 แนวทางการออกแบบฐานกฎ

แนวทางการออกแบบกฎแบบได้เป็น 2 วิธี คือ

1) วิธี เฮอร์ริสติก (Heuristic approach )

วิธีเฮอร์ริสติกเป็นการออกแบบกฎ จากพฤติกรรมการทำงานของระบบ ที่ได้จากประสบการณ์หรือจากการทดสอบและค่าสมรรถนะที่ต้องการนำมาออกแบบกฎ โดยประมาณได้โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ของอินพุตและผลการตอบสนอง

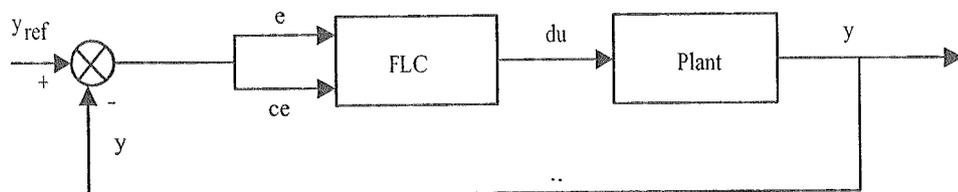
สมมติว่าพิจารณาระบบควบคุมฟuzzyแบบปิด ดังภาพประกอบที่ 2.21 มีค่าอินพุต 2 ตัวคือ ค่าผิดพลาด (e) และอัตราการผิดพลาด (ce) ค่าเอาต์พุต ( du ) การตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงระดับ (step response ) ดังภาพประกอบที่ 2.22 สามารถสร้างระบบฟuzzyที่มี phase plant ระหว่าง ค่าอินพุตทั้งสอง ดังภาพประกอบที่ 2.23 ค่าสมรรถนะที่เราต้องการคือค่าเวลาการเข้าถึงสั้น (short rise time) และเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินต่ำ (overshoot) เราสามารถแบ่งช่วงผลการตอบสนองของเอาต์พุตออกเป็นช่วงๆ และกำหนดกฎเพื่อให้ได้ค่าเอาต์พุตตามที่เราต้องการ เช่น

- ถ้าต้องการค่าเวลาการเข้าถึงสั้น เราสามารถออกแบบกฎได้เป็น

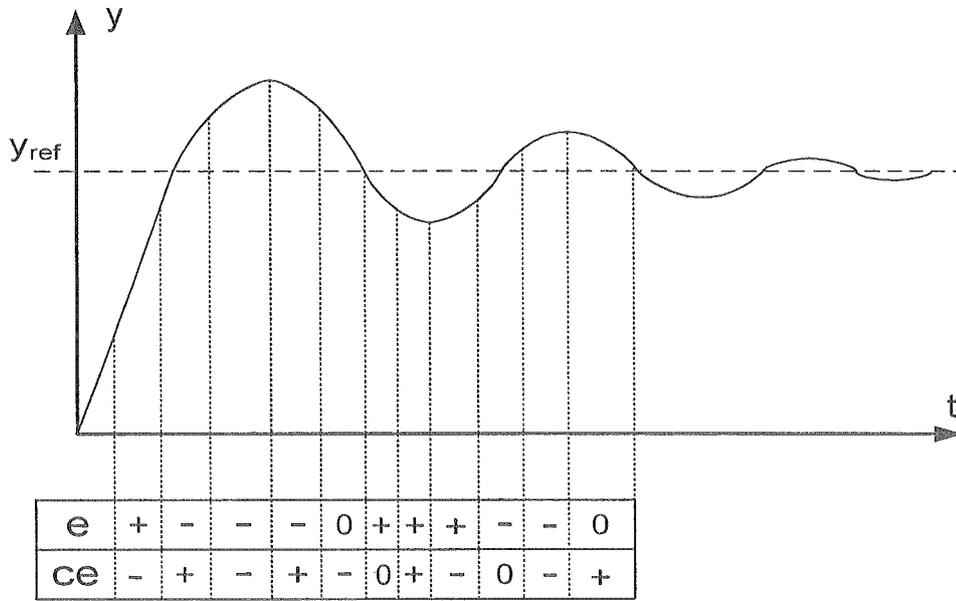
IF e is positive AND ce is negative THEN u is positive

- ถ้าต้องการลดค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน

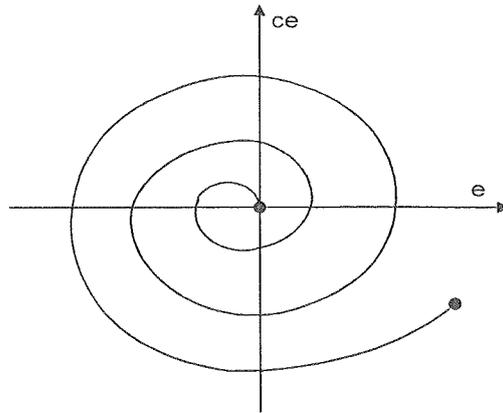
IF e is negative AND ce is negative THEN u is negative



ภาพประกอบที่ 2.21 ระบบควบคุมฟuzzyแบบลูปปิดแบบฟuzzy



ภาพประกอบที่ 2.22 ผลการตอบสนองของการเปลี่ยนระดับเพื่อหาความสัมพันธ์ของ e และ ce



ภาพประกอบที่ 2.23 Phase plant ของ e และ ce

จากหลักเกณฑ์ดังกล่าว สามารถสร้างเป็นตารางความสัมพันธ์อินพุตและเอาต์พุต และใช้เป็นแนวทางในการสร้างกฎของฟuzzyต่อไป

2) วิธี ดีเทอร์มินติค ( Deterministic approach) เป็นวิธีสร้างแบบจำลองอ้างอิงและนำไปออกแบบกฎ

#### 2.4.12 หลักการประมวลผลของตรรกศาสตร์คลุมเครือ

- 1) กำหนดวัตถุประสงค์การควบคุมและกฎเกณฑ์
- 2) กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุต และเลือกตัวแปรให้มีค่าน้อยที่สุดสำหรับเป็นอินพุตลงในตรรกศาสตร์คลุมเครือ

3) ใช้โครงสร้างกฎพื้นฐานกฎของตรรกศาสตร์คลุมเครือโดยกำหนดปัญหาการควบคุมให้อยู่ในรูปแบบของ ถ้า  $x$  และ  $y$  แล้ว ซึ่งเอาต์พุตที่ต้องการขึ้นอยู่กับเงื่อนไขแต่ละข้อของอินพุต จำนวนและความซับซ้อนของกฎ ขึ้นอยู่กับจำนวนตัวแปรของอินพุตที่เกี่ยวข้องกัน

4) สร้างสมาชิกของฟังก์ชันของตรรกศาสตร์คลุมเครือ

5) สร้างลำดับของตรรกศาสตร์คลุมเครือที่จำเป็นต้องประมวลผลก่อนและหลัง จึงนำซอฟต์แวร์ไปติดตั้งในฮาร์ดแวร์

6) การทดสอบระบบการประเมินผล ปรับกฎและสมาชิกของฟังก์ชันให้เหมาะสมและทดสอบซ้ำจนได้ผลลัพธ์เป็นที่พอใจและได้รับการยอมรับ