

บทที่ 3

การออกแบบตัวควบคุมพีไอและตัวควบคุมพีซีลอจิก

ในบทที่แล้วได้ให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ UPFC และได้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ที่จะควบคุมกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟได้อย่างอิสระ อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่ได้ยังขาดในส่วนของตัวควบคุม เนื้อหาในบทนี้เป็นการวิเคราะห์ และออกแบบตัวควบคุม เพื่อควบคุมการทำงานของ UPFC ในตอนต้นจะเป็นการออกแบบตัวควบคุมพีไอที่ใช้หลักการควบคุมเชิงเส้น และจะกล่าวถึงตัวควบคุมพีซีลอจิกที่ออกแบบขึ้นสำหรับ UPFC ในตอนท้าย

3.1 การออกแบบตัวควบคุมพีไอและพีไอ

จัดรูปสมการที่ (2.23) ในบทที่ 2 ใหม่ และกำหนดให้ R แทน r_l และ L แทน x_l/ω_{base} แล้วแปลงลาปลาซจะได้

$$\begin{bmatrix} i_{lp} \\ i_{lq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_1(s) & G_2(s) \\ -G_2(s) & G_1(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_s + e_d - v_{rd} \\ e_q - v_{rq} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

และ

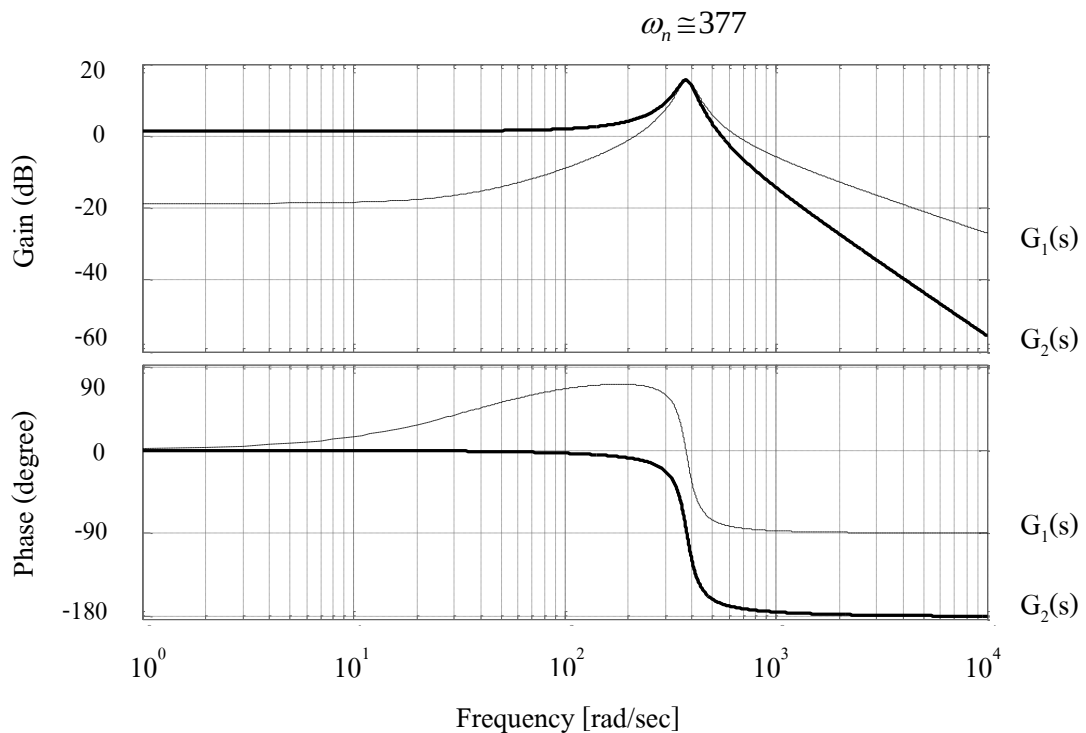
$$G_1(s) = \frac{(R + sL)/L^2}{s^2 + 2Rs/L + \omega_n^2} \quad (3.2)$$

$$G_2(s) = \frac{\omega_{base}/L}{s^2 + 2Rs/L + \omega_n^2} \quad (3.3)$$

และความถี่ธรรมชาติเป็น

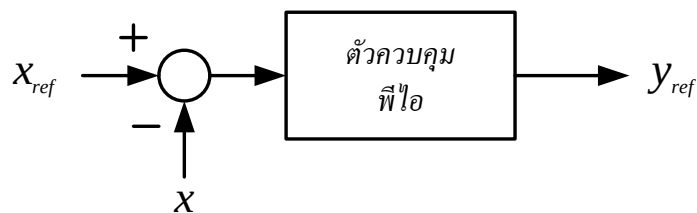
$$\omega_n = \frac{\sqrt{R^2 + (\omega_{base}L)^2}}{L} \quad (3.4)$$

สมมติให้ค่า $R = 0.083$ ต่อหน่วย ค่า $L = 0.0022$ ต่อหน่วย และ $\omega_{base} = 2\pi 60$ เรเดียน/วินาที จะได้โบคไดอะแกรม (bode diagram) ของฟังก์ชันส่งทอด $G_1(s)$ และ $G_2(s)$ ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งจะเห็นว่า ที่ความถี่ต่ำกว่า ω_n อัตราขยายของ $G_2(s)$ จะสูงกว่า $G_1(s)$ และไม่มีมุมหน่วง (phase delay) ดังนั้นการปรับแรงดัน e_d จะส่งผลต่อ i_{lq} และการควบคุมแรงดัน e_q จะส่งผลต่อ i_{lp}

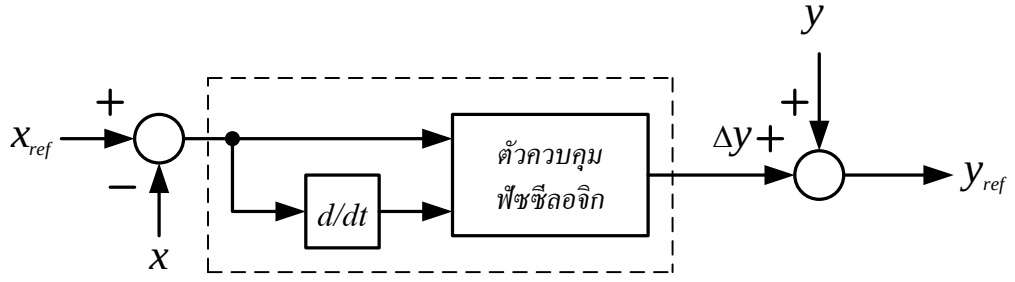


รูปที่ 3.1 โพลไดอะแกรมของสายส่ง : $G_1(s)$ และ $G_2(s)$

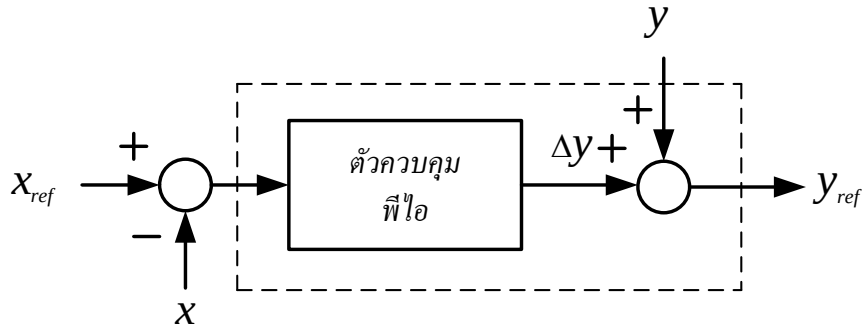
รูปที่ 3.2 แสดงโครงสร้างตัวควบคุมพีไอ จะเห็นได้ว่าเอาต์พุตจากตัวควบคุมพีไอ (y_{ref}) จะถูกส่งไปควบคุมระบบโดยตรง หากค่า y_{ref} เปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน อาจส่งผลให้เอาต์พุตของระบบแกว่งอย่างรุนแรงได้ สำหรับตัวควบคุมพีซีลอจิกนั้นในวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบให้คำนวณอัตราเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุม (Δy) นำไปรวมกับสัญญาณควบคุมเดิม (y) แล้วจึงได้เป็นสัญญาณควบคุมอ้างอิง (y_{ref}) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 กล่าวคือมีการนำเอาต์พุตที่ได้จากตัวควบคุมพีซีมาผ่านการอินทิเกรต (integrate) ก่อนจะส่งไปควบคุมระบบ ในที่นี้เพื่อศึกษาผลของตัวอินทิเกรเตอร์ที่มีต่อระบบควบคุมจึงออกแบบตัวควบคุมเรียกว่า “ตัวควบคุมพีไอไอ” ซึ่งมีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 3.4 จากรูปจะเห็นได้ว่าตัวควบคุมพีไอไอคือ การนำเอาเอาต์พุตจากตัวควบคุมพีไอมาผ่านตัวอินทิเกรเตอร์ก่อนจะส่งไปควบคุมระบบนั่นเอง



รูปที่ 3.2 โครงสร้างตัวควบคุมพีไอ



รูปที่ 3.3 โครงสร้างตัวควบคุมฟลักซ์ล่อจิก



รูปที่ 3.4 โครงสร้างตัวควบคุมพีไอ

3.1.1 การออกแบบตัวควบคุมพีไอ

หากกำหนดให้แรงดันอ้างอิงในแกน d (e_d^*) และแกน q (e_q^*) ได้มาจากกระแสอ้างอิงในแกน d (i_{lp}^*) และแกน q (i_{lq}^*) ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (3.5)

$$\begin{bmatrix} e_d^* \\ e_q^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -K_q \left(1 + \frac{1}{sT_i}\right) \\ K_p \left(1 + \frac{1}{sT_i}\right) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{lp}^* - i_{lp} \\ i_{lq}^* - i_{lq} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

จะได้ฟังก์ชันส่งทอดของ $\frac{i_{lp}(s)}{i_{lp}^*(s)}$ ที่ความถี่ต่ำเป็น

$$\frac{i_{lp}(s)}{i_{lp}^*(s)} = \left(\frac{K_p \omega_{base}}{L} \right) \frac{s + \frac{1}{T_i}}{s^3 + \frac{2R}{L}s^2 + \left(\omega_n^2 + K_p \frac{\omega_{base}}{L} \right)s + \left(\frac{K_p \omega_{base}}{LT_i} \right)} \quad (3.6)$$

และฟังก์ชันส่งทอดของ $\frac{i_{lp}(s)}{-v_{rq}(s)}$ ที่ความถี่ต่ำเป็น

$$\frac{i_{lp}(s)}{-v_{rq}(s)} = \left(\frac{\omega_{base}}{LT_i} \right) \frac{1}{s^3 + \frac{2R}{L}s^2 + \left(\omega_n^2 + K_p \frac{\omega_{base}}{L} \right)s + \left(\frac{K_p \omega_{base}}{LT_i} \right)} \quad (3.7)$$

เมื่อกำหนดให้ $K_q = K_p$ จะได้ว่า

$$\frac{i_{lq}(s)}{i_{lq}^*(s)} = \frac{i_{lp}(s)}{i_{lp}^*(s)} \quad (3.8)$$

และ

$$\frac{i_{lq}(s)}{(v_s(s) - v_{rd}(s))} = - \frac{i_{lp}(s)}{-v_{rq}(s)} \quad (3.9)$$

3.1.2 การออกแบบตัวควบคุมพีไอไอ

จะกำหนดให้แรงดันอ้างอิงในแกน $d (e_d^*)$ และแกน $q (e_q^*)$ ได้มาจากกระแสอ้างอิงในแกน $d (i_{lp}^*)$ และแกน $q (i_{lq}^*)$ ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (3.10)

$$\begin{bmatrix} e_d^* \\ e_q^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{K_q}{sT_s} \left(1 + \frac{1}{sT_i} \right) \\ \frac{K_p}{sT_s} \left(1 + \frac{1}{sT_i} \right) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{lp}^* - i_{lp} \\ i_{lq}^* - i_{lq} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

โดยที่ T_s คือ คาบการสุ่ม (sampling period)

และจะได้ฟังก์ชันส่งทอดของ $\frac{i_{lp}(s)}{i_{lp}^*(s)}$ ที่ความถี่ต่ำเป็น

$$\frac{i_{lp}(s)}{i_{lp}^*(s)} = \left(\frac{K_p \omega_{base}}{LT_s} \right) \frac{s + \frac{1}{T_i}}{s^4 + \frac{2R}{L}s^3 + \omega_n^2 s^2 + \frac{K_p \omega_{base}}{LT_s}s + \left(\frac{K_p \omega_{base}}{LT_s T_i} \right)} \quad (3.11)$$

และฟังก์ชันส่งทอดของ $\frac{i_{lp}(s)}{-v_{rq}(s)}$ ที่ความถี่ต่ำเป็น

$$\frac{i_{lp}(s)}{-v_{rq}(s)} = \left(\frac{\omega_{base}}{LT_s} \right) \frac{1}{s^4 + \frac{2R}{L}s^3 + \omega_n^2 s^2 + \frac{K_p \omega_{base}}{LT_s} s + \left(\frac{K_p \omega_{base}}{LT_s T_i} \right)} \quad (3.12)$$

เมื่อกำหนดให้ $K_q = K_p$ จะได้ว่า

$$\frac{i_{lq}(s)}{i_{lq}^*(s)} = \frac{i_{lp}(s)}{i_{lp}^*(s)} \quad (3.13)$$

และ

$$\frac{i_{lq}(s)}{(v_s(s) - v_{rd}(s))} = - \frac{i_{lp}(s)}{-v_{rq}(s)} \quad (3.14)$$

ค่าอัตราขยาย K_p และ T_i ที่เหมาะสมของตัวควบคุมพีไอทั้งสองวิธี สามารถหาได้จาก การดูตำแหน่งจุดขั้ว (poles) จุดศูนย์ (zeros) และผลการตอบสนองของฟังก์ชันส่งทอด เมื่อสัญญาณ อินพุตเป็นฟังก์ชันสเตป (step function)

ในหัวข้อที่ 3.1.1 และ 3.1.2 ได้แสดงการวิเคราะห์การออกแบบตัวควบคุมพีไอ เพื่อ ควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง สำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอ เพื่อควบคุมแรงดันบัส ด้านส่ง และแรงดันแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงเชื่อมโยง ก็สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยวิธีการเดียวกัน

3.2 การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีลอจิก

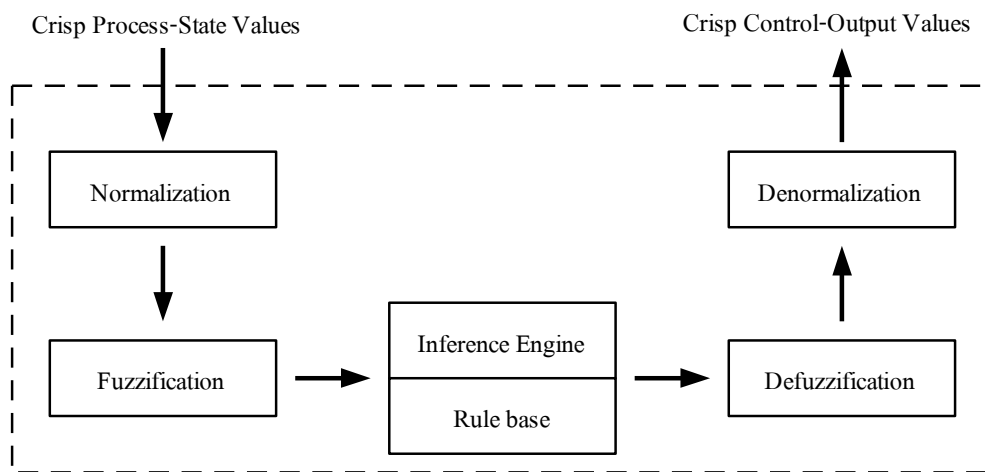
ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกเป็นตัวควบคุมไม่เป็นเชิงเส้น ที่มีการป้อนกลับแบบอัตโนมัติ ซึ่ง ถูกออกแบบขึ้นจากฐานความรู้ของมนุษย์ และมีการพิจารณาตัวแปรที่เกี่ยวข้องให้เป็นตัวแปรเชิง ภาษามนุษย์ (linguistic language) ส่งผลให้ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกมีข้อดีหลายประการ คือ ค่า อัตราขยายอยู่ในช่วงกว้าง ให้ผลตอบสนองที่รวดเร็ว มีความทนทานต่อสัญญาณรบกวน เหมาะกับ ระบบที่ค่าตัวแปรไม่แน่นอน และการออกแบบไม่ซับซ้อนเข้าใจง่าย

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำหลักการฟัซซีลอจิกมาออกแบบตัวควบคุมฟัซซีลอจิกสำหรับควบคุม การทำงานของ UPFC โดยตัวควบคุมฟัซซีลอจิกที่ออกแบบมีสี่ตัวควบคุม เพื่อควบคุมแรงดันบัส

แหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงเชื่อมโยง กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ในการออกแบบ กำหนดให้อินพุตของตัวควบคุมเป็นสัญญาณผิดพลาด และอัตราเปลี่ยนแปลงของสัญญาณผิดพลาด และมีเอาต์พุตเป็นแรงดันควบคุมที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งเอาต์พุตที่ได้จากตัวควบคุมฟัซซีลอจิกจะถูก รวมกับแรงดันควบคุมในรอบที่ผ่านมา แล้วผลลัพธ์ที่ได้จึงจะเป็นแรงดันควบคุมในรอบนี้

3.2.1 โครงสร้างพื้นฐานของตัวควบคุมฟัซซีลอจิก

ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกที่ใช้ควบคุมระบบมีโครงสร้างพื้นฐานดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 โครงสร้างพื้นฐานของตัวควบคุมฟัซซีลอจิก

- ฟัซซิฟิเคชัน (fuzzification)

เป็นการเปลี่ยนค่าจริงไปเป็นค่าทางฟัซซี สำหรับค่าจริงเป็นค่าที่ถูกป้อนเพื่อเป็นอินพุตให้แก่ระบบควบคุม อินพุตของตัวควบคุมเป็นสัญญาณผิดพลาด และอัตราเปลี่ยนแปลงของสัญญาณผิดพลาด ส่วนของเอาต์พุตเป็นอัตราเปลี่ยนแปลงของแรงดันควบคุม

ตัวอย่าง

$$e(n) = v_{dc,ref} - v_{dc}(n)$$

$$\Delta e(n) = e(n) - e(n-1)$$

โดยที่ $e(n)$ คือ สัญญาณผิดพลาด ณ ลำดับเวลา n

$\Delta e(n)$ คือ อัตราเปลี่ยนแปลงของสัญญาณผิดพลาด ณ ลำดับเวลา n

สำหรับฟังก์ชันสมาชิกของอินพุตและเอาต์พุต สามารถนิยามได้ 2 แบบ คือ นิยามเชิงตัวเลข และนิยามเชิงฟังก์ชัน การนิยามเชิงตัวเลขจะแสดงค่าฟังก์ชันสมาชิกของฟัซซีเซตเป็นเวกเตอร์ของจำนวน ซึ่งจำนวนของเวกเตอร์จะขึ้นกับระดับการแบ่งย่อย สำหรับการนิยามเป็นฟังก์ชันจะแสดงค่าฟังก์ชันสมาชิกในลักษณะกราฟ โดยมีรูปภาพของฟัซซีเซตหลายเซตประกอบกัน

- กฎพื้นฐาน (rule base)

กฎพื้นฐานที่ใช้ควบคุมได้จากการนำฐานข้อมูล (data base) ที่มีอยู่มาพิจารณาหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอินพุตกับตัวแปรเอาต์พุตตามหลักการของฟัซซี แล้วเขียนเป็นกฎพื้นฐานทางฟัซซี (if-then rules) การที่จะได้มาซึ่งกฎพื้นฐานมี 3 แนวทางหลักคือ

แนวทางที่ 1: เป็นแนวทางที่ในปัจจุบันนิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง แนวทางนี้กฎฟัซซีที่ได้จะมาจากความรู้บนพื้นฐานของประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงาน หรือความรู้ของวิศวกรควบคุมในทางปฏิบัติแนวทางนี้มี 2 วิธีคือ วิธีแรกนำความรู้บนพื้นฐานของประสบการณ์มาวิเคราะห์แล้วแสดงออกมาเป็นคำพูด และวิธีที่สองเป็นการซักถามเพื่อสืบหาข้อเท็จจริงจากผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งจะต้องตั้งคำถามอย่างครอบคลุม ทั้งสองวิธีที่กล่าวมาช่วยให้ได้กฎพื้นฐานเบื้องต้น แล้วจึงนำกฎพื้นฐานเบื้องต้นนี้ไปประยุกต์ใช้งานต่อไป

แนวทางที่ 2: เป็นแนวทางที่มีขั้นตอนง่าย โดยการมองระบบเหมือนกับว่ามีแบบจำลองฟัซซีอยู่แล้ว ต่อมาทำการป้อนอินพุตให้ระบบและเก็บเอาต์พุตที่ได้ แล้วนำความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตที่ได้มาออกแบบกฎฟัซซี

แนวทางที่ 3: เป็นแนวทางที่มีขั้นตอนง่ายอีกแนวทางหนึ่ง แนวทางนี้จะใช้แบบจำลองกระบวนการดั้งเดิมที่มีอยู่ เช่น ใช้ตัวควบคุมพีไอหรือตัวควบคุมพีเป็นแบบจำลอง แล้วจะนำผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์การทำงานของแบบจำลองกระบวนการดั้งเดิมเหล่านั้น มาออกแบบกฎทางฟัซซี ดังนั้นแนวทางนี้จึงอาจทำให้เหมือนกับตัวควบคุมฟัซซีที่ได้เป็นตัวควบคุมเชิงเส้น

- การวินิจฉัยกฎ (inference engine)

เป็นส่วนที่ทำหน้าที่วินิจฉัยหาข้อสรุปของปัญหา ซึ่งสามารถทำได้โดยการพิจารณากฎพื้นฐานร่วมกับฟังก์ชันสมาชิกของอินพุตและเอาต์พุต วิธีการวินิจฉัยกฎสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ การประกอบบนพื้นฐานการวินิจฉัย (composition base inference) และ การวิเคราะห์แต่ละกฎบนพื้นฐานการวินิจฉัย (individual-rule based inference)

การปรองดองบนพื้นฐานการวินิจฉัยจะมีการแทนความหมายของแต่ละกฎ
 อย่างเป็นอิสระ แล้วสรุปให้อยู่ในหนึ่งความสัมพันธ์ฟัซซี (fuzzy relation) ในความสัมพันธ์ฟัซซีมี
 การบรรยายความหมายของทุกเซตของกฎ ต่อมาก็พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าอินพุตจริงที่ถูก
 แปลงเป็นค่าฟัซซีแล้วกับความสัมพันธ์ฟัซซี ผลลัพธ์ที่ได้จะแทนความสัมพันธ์ของทุกกฎและทุก
 เซต และถูกนำไปทำการดีฟัซซิฟิเคชันต่อไป

การวิเคราะห์แต่ละกฎบนพื้นฐานการวินิจฉัยจะนำค่าอินพุตจริงไปหาค่าทาง
 ฟัซซีในแต่ละเซต แล้วหาความหมายตามกฎ โดยจะทำการที่ละกฎเฉพาะกฎที่เข้ากับค่าอินพุตได้เท่านั้น
 แล้วค่อยนำค่าของแต่ละกฎมาสรุปเป็นคำตอบของกฎในฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต เพื่อทำการดี
 ฟัซซิฟิเคชันต่อไป

จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าการปรองดองบนพื้นฐานการวินิจฉัยมีข้อด้อย คือ มี
 การใช้หน่วยความจำมาก ในขณะที่การวิเคราะห์แต่ละกฎบนพื้นฐานการวินิจฉัยเป็นวิธีที่มี
 ประสิทธิภาพสูงและประหยัดหน่วยความจำ ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงเลือกวิธีการวินิจฉัยกฎแบบการ
 วิเคราะห์แต่ละกฎบนพื้นฐานการวินิจฉัย และเลือกใช้ตัวดำเนินการแบบ SUP-MIN [4] กล่าวคือ
 ฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุตของแต่ละกฎได้มาโดยตัวดำเนินการ MIN (minimum) และเอาต์พุต
 ฟัซซีรวมกันโดยตัวดำเนินการ SUP (supreme หรือ maximum)

- ดีฟัซซิฟิเคชัน (defuzzification)

เป็นการแปลงค่าทางฟัซซีกลับไปเป็นค่าจริง เพื่อนำไปใช้ในการควบคุม หรือ
 การตัดสินใจ วิธีดีฟัซซิฟิเคชันที่ใช้กันแพร่หลาย เช่น COA (Center of Area) MOM (Middle of
 Maxima) และ HM (Height Method) หลักการเลือกวิธีดีฟัซซิฟิเคชันนั้นไม่มีรูปแบบที่แน่นอน
 อย่างไรก็ตามมีปัจจัยการเลือกที่ควรคำนึง [4] เช่น ความต่อเนื่อง (continuity) ความกำกวม
 (disambiguity) และความซับซ้อนในการคำนวณ (computation complexity) เป็นต้น เนื่องจาก
 วิทยานิพนธ์นี้เวลาที่ใช้คำนวณเป็นสิ่งสำคัญ จึงเลือกวิธี HM เพราะเป็นวิธีที่ให้สมรรถนะที่ดีและมี
 การคำนวณรวดเร็ว

วิธีดีฟัซซิฟิเคชันแบบ HM เป็นวิธีที่มีความง่ายและรวดเร็วมาก วิธีนี้จะนำ
 ค่าสูงสุดของเอาต์พุตในแต่ละเซตคูณกับค่าน้ำหนักเอาต์พุตของเซตนั้น ๆ แล้วนำผลคูณของแต่ละ
 เซตที่ได้มารวมกัน ต่อมนำผลรวมที่ได้หารด้วยผลรวมของค่าสูงสุดของเอาต์พุตทุกเซต ผลลัพธ์ที่
 ได้เป็นเอาต์พุต (u^*) ของวิธีนี้ สำหรับวิธี HM ในระบบที่มี m กฎเขียนได้เป็น

$$u^* = \frac{\sum_{i=1}^m c_i f_i}{\sum_{i=1}^m f_i} \quad (3.1)$$

โดยที่ c_i คือ ค่าสูงสุดของแต่ละเซตเอาต์พุตที่เข้ากับกฎที่ i
 f_i คือ ความสูงของกฎที่ i

- ดินอร์มัลไลซ์เซชัน (denormalization)

เป็นการใช้ค่าสเกลการแปลงเพื่อส่งค่าเอาต์พุตในฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุตให้อยู่ในขอบเขตของค่าเอาต์พุตจริงที่จะส่งออกไปควบคุมระบบ ซึ่งแต่ละตัวควบคุมจะมีขอบเขตดินอร์มัลไลซ์เซชันที่แตกต่างกัน

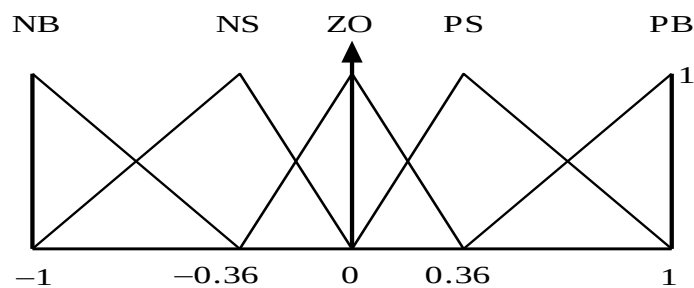
3.2.2 การออกแบบฟังก์ชันสมาชิกและกฎพื้นฐานทางฟัซซี

เนื่องจากระบบ UPFC ที่สนใจยังไม่มีฐานข้อมูล การพิจารณาฟังก์ชันสมาชิกและกฎพื้นฐานทางฟัซซีจำเป็นต้องรอประสบการณ์จากการทำงานของระบบจริง เพื่อให้ทราบคุณลักษณะของระบบก่อน อย่างไรก็ตามเนื่องจากการรอผลการทำงานของระบบจริงมีความไม่สะดวก จึงได้ทำการจำลองระบบเพื่อเก็บผลลัพธ์ที่ได้มาใช้เป็นฐานข้อมูลในการออกแบบฟังก์ชันสมาชิกและกฎพื้นฐาน

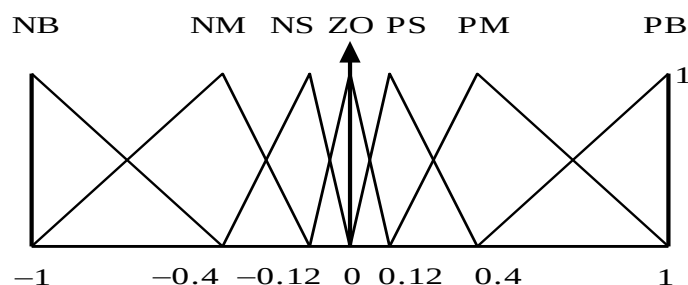
เนื่องจากต้องการออกแบบให้ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกมีเอาต์พุตเป็นการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุม จึงได้จำลองระบบ UPFC ที่ควบคุมการทำงานด้วยตัวควบคุมพีไอโอขึ้นก่อน แล้วใช้ผลลัพธ์ที่ได้มาเป็นฐานข้อมูลทางฟัซซี โดยฐานข้อมูลที่ได้ทำให้ทราบว่าพฤติกรรมของสัญญาณที่ต้องควบคุมมีความแตกต่างกันอย่างไร และมีผลกระทบต่อสมรรถนะเชิงพลวัตโดยรวมของ UPFC อย่างไร จากองค์ความรู้ดังกล่าวจึงออกแบบฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแตกต่างกัน โดยตัวควบคุมฟัซซีลอจิกที่ใช้ควบคุมแรงดันบัสและแรงดันแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงเชื่อมโยง มีฟังก์ชันสมาชิกของอินพุตและเอาต์พุตดังรูปที่ 3.6 ซึ่งใช้เซตย่อยของฟัซซีจำนวน 5 เซต คือ PB (Positive Big) PS (Positive Small) ZO (Zero) NS (Negative Small) และ NB (Negative Big) สำหรับตัวควบคุมฟัซซีลอจิกที่ควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลในสายส่ง มีฟังก์ชันสมาชิกของอินพุตและเอาต์พุตดังรูปที่ 3.7 ซึ่งใช้เซตย่อยฟัซซีจำนวน 7 เซต คือ PB (Positive Big) PM (Positive Medium) PS (Positive Small) ZO (Zero) NS (Negative Small) NM (Negative Medium) และ NB (Negative Big)

จากฐานข้อมูลที่ได้และฟังก์ชันสมาชิกที่ออกแบบ ทำให้ได้กฎพื้นฐานของตัวควบคุมฟัซซีลอจิก สำหรับใช้ควบคุมควบคุมแรงดันบั๊สและแรงดันแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงเชื่อมโยง ดังในตารางที่ 3.1 และกฎพื้นฐานของตัวควบคุมฟัซซีลอจิกที่ใช้ควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ดังในตารางที่ 3.2

เมื่อนำกฎควบคุมฟัซซีมาคำนวณหาพื้นผิวผลตอบสนอง (Surface Response) ของแรงดันบั๊สและแรงดันแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงเชื่อมโยง จะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 3.8 ส่วนรูปที่ 3.9 แสดงพื้นผิวผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ โดยรูปทั้งสองได้แสดงให้เห็นพฤติกรรมเอาต์พุตที่ได้หลังจากผ่านการวินิจฉัยกฎ และการดีฟัซซิฟิเคชัน สังเกตว่าเอาต์พุตที่ออกจากตัวควบคุม (Δy) จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างค่อยเป็นค่อยไปและมีความต่อเนื่อง ซึ่งช่วยให้สัญญาณควบคุมที่ได้ไม่เปลี่ยนแปลงค่าอย่างฉับพลัน



รูปที่ 3.6 ฟังก์ชันสมาชิกตัวควบคุมแรงดันบั๊สและแรงดันแหล่งจ่าย
แรงดันกระแสตรงเชื่อมโยง



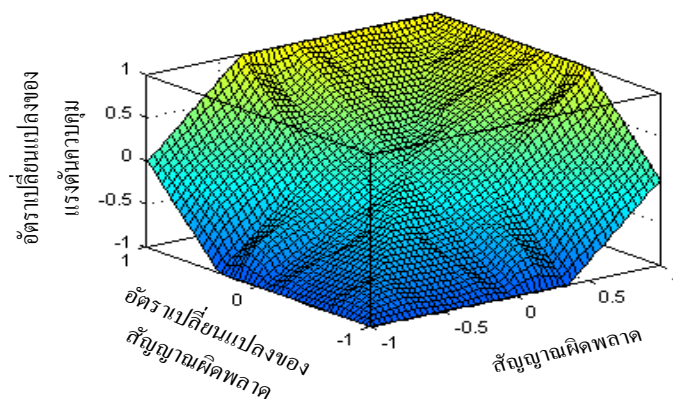
รูปที่ 3.7 ฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง
และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

ตารางที่ 3.1 กฎพื้นฐานของตัวควบคุมแรงดันบัสและแรงดันแหล่งจ่าย
แรงดันกระแสตรงเชื่อมโยง

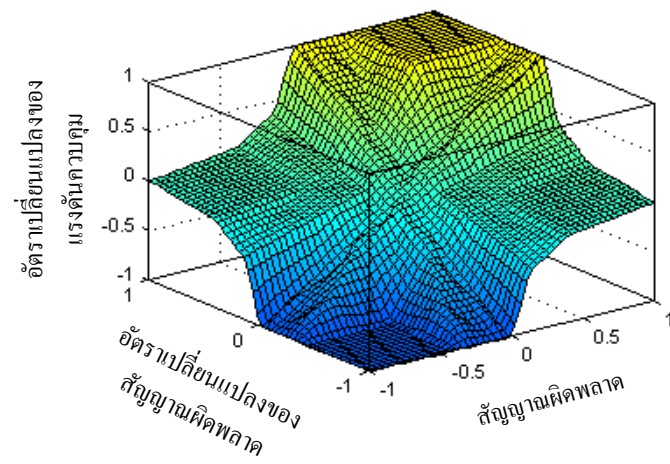
อัตราเปลี่ยนแปลงของสัญญาณผิดพลาด						
สัญญาณผิดพลาด		NB	NS	ZO	PS	PB
	NB	NB	NB	NB	NB	ZO
	NS	NB	NS	NS	ZO	PB
	ZO	NB	NS	ZO	PS	PB
	PS	NB	ZO	PS	PS	PB
	PB	ZO	PB	PB	PB	PB

ตารางที่ 3.2 กฎพื้นฐานของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

อัตราเปลี่ยนแปลงของสัญญาณผิดพลาด								
สัญญาณผิดพลาด		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
	NM	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	PS
	NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PM
	ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
	PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
	PM	NS	ZO	PS	PM	PM	PB	PB
	PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB



รูปที่ 3.8 พื้นผิวผลตอบสนองของตัวควบคุมแรงดันบัสและแรงดัน
แหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงเชื่อมโยง



รูปที่ 3.9 พื้นผิวผลตอบสนองของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ