บทที่ 3

การควบคุมแบบเจเนริกโมเดล
(Generic Model Control)

การควบคุมแบบเจเนริกโมเดล (Generic Model Controller, GMC) เป็นการควบคุมที่ขึ้นกับแบบจำลองของกระบวนการเป็นหลัก โดยแบบจำลองที่ใช้ในการควบคุมจะเป็นแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นหรือแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นก็ได้ ในการคำนวณค่าตัวแปรปรับเพื่อควบคุมตัวแปรควบคุมให้อยู่ที่ค่าที่ต้องการ จะมีค่าตัวแปรอื่น ๆ รวมทั้งพารามิเตอร์ของกระบวนการเข้ามามีส่วนเกี่ยวข้องด้วย ซึ่งในที่นี้ต้องมีการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา ควบคู่ไปกับการควบคุมกระบวนการ

3.1 การออกแบบตัวควบคุมแบบจีเอ็มซี

การควบคุมแบบจีเอ็มซีเป็นเทคนิคที่พัฒนาเพื่อใช้ในการควบคุมกระบวนการที่มีแบบจำลองแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยพิจารณาดังนี้

3.1.1 จีเอ็มซีอัลกอริทึม (GMC Algorithm)

3.1.1.1 แบบจำลองของกระบวนการ ซึ่งอยู่ในรูปความสัมพันธ์ของตัวแปรสภาวะ (State Variable, x), ตัวแปรปรับ (Manipulate Variable, u) และเวลา (Time, t) ในรูปแบบสมการอันดับหนึ่ง แสดงได้ดังนี้

$$F(x,u,t) \qquad (3\text{-}1)$$

3.1.1.2 การเปลี่ยนแบบจำลองให้อยู่ในจีเอ็มซีอัลกอริทึม (GMC Algorithm) โดยการทำอนุพันธ์ของแบบจำลองของตัวแปรสภาวะ ให้มีค่าเท่ากับเทอมพรอบพอชันนัลอินทิกัล

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(Proportional Integral) ที่กระทำบนผลต่างของตัวแปรควบคุมที่เวลาใด ๆ กับค่าตัวแปรที่ต้องควบคุม (Y*) นั่นคือ

$$\frac{dx}{dt} = F(x, u, t) \qquad (3\text{-}2)$$

$$Y = H(x) \qquad (3\text{-}3)$$

จาก (3-3) ทำการหาอนุพันธ์ได้ดังนี้

$$\dot{Y} = \frac{\partial H(x)}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial t} \qquad (3\text{-}4)$$

แทนด้วย (3-2)

$$\dot{Y} = \frac{\partial H(x)}{\partial x} . F(x, u, t) \qquad (3\text{-}5)$$

ซึ่งส่วนใหญ่

$$\frac{\partial H(x)}{\partial x} = 1 \qquad (3\text{-}6)$$

ดังนั้น

$$\dot{Y} = F(x, u, t) \qquad (3\text{-}7)$$

พิจารณาตัวแปรปรับเป็น 2 กรณี ดังนี้คือ

กรณีที่ 1 Y* คือแบบจำลองของกระบวนการที่มีการย้อนกลับเข้าสู่สภาวะคงตัว สามารถเขียนสมการ ได้ดังนี้

$$\dot{Y} = K_1(\dot{Y} - Y) \qquad (3\text{-}8)$$

กรณีที่ 2 Y* คือแบบจำลองของกระบวนการที่มีค่าเอาท์พุทที่ต้องการเท่ากับค่าเซ็ตพอยต์ (Set Point) สามารถเขียนสมการ ได้ดังนี้

$$\dot{Y} = \int_0^t K_2(\dot{Y} - Y)dt \qquad (3\text{-}9)$$

เพื่อเพิ่มสมรรถนะ (Performance) ของการควบคุมแบบจีเอ็มซีอัลกอริทึมเป็นการรวมแบบจำลองของกระบวนการทั้ง 2 กรณี ได้ดังนี้

$$\dot{Y} = K_1(\dot{Y} - Y) + \int_0^t K_2(\dot{Y} - Y)dt \qquad (3-10)$$

เมื่อ Y คือค่าเอาท์พุทที่ได้ของกระบวนการ

$\dot{Y}$ คือค่าเอาท์พุทที่ต้องการ

K_1 คือค่าคงที่ในการปรับ (Turning Parameter)

K_2 คือค่าคงที่ในการปรับ (Turning Parameter)

ดังนั้นจากสมการ 3-7 และสมการ 3-10 จะได้

$$K_1(\dot{Y} - Y) + \int_0^t K_2(\dot{Y} - Y)dt = F(x,u,t) \qquad (3-11)$$

ในสมการ 3-11 เป็นอัลกอริทึมแบบต่อเนื่อง ซึ่งสามารถทำให้อยู่ในรูปดิสคริต (Discrete Form) โดยใช้วิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) ได้ดังนี้

$$F(x,u,t)^{(k)} = K_1(t)(\dot{Y} - Y^{(k)}) + K_2\sum_0^k(\dot{Y} - Y^{(k)})\Delta t \qquad (3-12)$$

ข้อดีและข้อจำกัดของการควบคุมแบบจีเอ็มซี

จากสมการแสดงให้เห็นว่าสมรรถนะของการควบคุมแบบจีเอ็มซี เกี่ยวข้องกับความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ ซึ่งการควบคุมแบบจีเอ็มซีสามารถใช้กับแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้ แต่อย่างไรก็ตามการประยุกต์ใช้งานของการควบคุมแบบจีเอ็มซีมีข้อจำกัด คือใช้ได้กับระบบซึ่งมีความเชิงเส้นในตัวแปรปรับ (Linear in Control) หรือระดับกำลังหนึ่ง (Relative Degree One)

การนำการควบคุมแบบจีเอ็มซีไปใช้ในการควบคุมกระบวนการต้องมีการตรวจสอบ ดังนี้

1. ความเป็นเชิงเส้นของตัวแปรปรับ (u)
2. ซีโรส์ไดนามิกส์ (Zeros dynamics) หมายถึงอินเตอร์นอลไดนามิกส์ (Internal dynamics) ในสภาวะที่ตัวแปรควบคุมถูกควบคุมให้อยู่ในตำแหน่งเซ็ตพอยต์ (Set point) ที่ต้องการ นั่นคือตัวแปรควบคุมมีค่าเท่ากับศูนย์ในรูปของค่าเบี่ยงเบน โดยเป็นการบอกว่ากระบวนการที่ถูกควบคุมมีเสถียรภาพหรือไม่ เมื่อตัวแปรควบคุมถูกควบคุมให้อยู่ในตำแหน่งเซ็ตพอยต์ที่ต้องการ

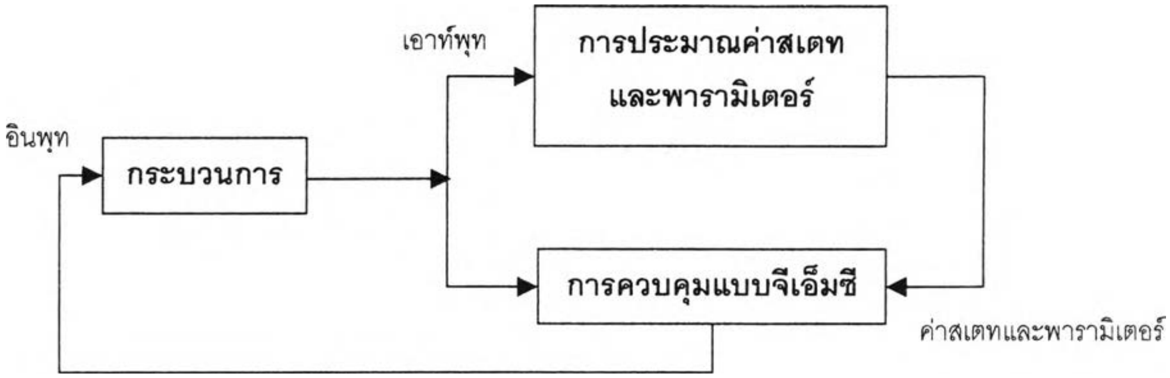
ความทนทานของตัวควบคุมแบบจีเอ็มซี

- การควบคุมแบบจีเอ็มซีสามารถรับประกันความมีเสถียรภาพของระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงได้
- การควบคุมแบบจีเอ็มซีสามารถใช้กับระบบที่มีความผิดพลาดในกระบวนการผลิตและแบบจำลอง (Plant / Model Mismatch) ได้หรือไม่ได้ในบางกรณี

3.2 การประมาณค่าสเตทและพารามิเตอร์ (State and Parameter Estimation)

การควบคุมแบบจีเอ็มซีเป็นการควบคุมที่ขึ้นกับแบบจำลองของกระบวนการ เพราะฉะนั้นในการคำนวณค่าตัวแปรปรับเพื่อควบคุมตัวแปรควบคุมให้อยู่ในค่าที่ต้องการนั้น ค่าตัวแปรต่าง ๆ รวมถึงพารามิเตอร์ของกระบวนการมีส่วนเกี่ยวข้องในการคำนวณ ดังนั้นเมื่อค่าตัวแปรต่าง ๆ ผิดพลาด หรือค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการแบบจีเอ็มซีแตกต่างจากกระบวนการจริง จะทำให้การคำนวณค่าตัวแปรปรับไม่เหมาะสม ทำให้การควบคุมกระบวนการไม่ได้ตามที่ต้องการ ในบางกรณีที่ไม่สามารถวัดค่าตัวแปรได้ทำให้ไม่สามารถประยุกต์ใช้การควบคุมแบบจีเอ็มซีได้ ซึ่งสามารถแก้ไขโดยการประมาณค่าตัวแปรสเตทหรือพารามิเตอร์ เข้ามาช่วยในการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ไม่แน่นอน รวมทั้งค่าตัวแปรสเตทที่วัดค่าไม่ได้

ซึ่งการควบคุมกระบวนการแบบจีเอ็มซีที่มีการประมาณค่าตัวแปรสเตทหรือพารามิเตอร์เป็นเทคนิคที่ใช้ค่าเอาท์พุทที่สามารถวัดค่าได้มาใช้ในการประมาณหรือทำนายค่าตัวแปรสเตทที่วัดค่าไม่ได้ หรือพารามิเตอร์ที่มีค่าไม่แน่นอน โดยระบบที่ศึกษาต้องสามารถสังเกตได้ (Observability)



รูปที่ 3.1 แสดงการควบคุมแบบจีเอ็มซีร่วมกับการประมาณค่าสเตทและพารามิเตอร์

จะเห็นได้ว่าค่าเอาท์พุทของกระบวนการที่วัดค่าได้จะนำมาใช้ในประมาณค่าตัวแปรสเตทหรือพารามิเตอร์ โดยใช้ตัวประมาณค่าความร้อนต่าง ๆ เช่น การประมาณค่าความร้อนออนไลน์ ตัวกรองคาลมาน ซึ่งใช้ค่าสเตทหรือพารามิเตอร์ที่ได้จากการประมาณส่งเข้าควบคุมการควบคุมแบบจีเอ็มซี เพื่อทำการคำนวณค่าตัวแปรปรับต่อไป ดังนั้นตัวประมาณค่าจะมีบทบาทอย่างมากต่อประสิทธิภาพของตัวควบคุมแบบจีเอ็มซี ถ้าตัวประมาณค่าให้ผลการประมาณที่ดี ตัวควบคุมแบบจีเอ็มซีจะสามารถคำนวณค่าตัวแปรปรับได้อย่างเหมาะสม ทำให้สามารถควบคุมตัวแปรควบคุมให้อยู่ในค่าที่ต้องการได้

ความทนทานของตัวควบคุมแบบจีเอ็มซีร่วมกับการประมาณค่าสเตทและพารามิเตอร์

- การควบคุมแบบจีเอ็มซีร่วมกับการประมาณค่าสเตทและพารามิเตอร์ สามารถรับประกันความมีเสถียรภาพของระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงได้ในช่วงกว้าง
- การควบคุมแบบจีเอ็มซีร่วมกับการประมาณค่าสเตทและพารามิเตอร์ สามารถใช้กับระบบที่มีความผิดพลาดในกระบวนการผลิตและแบบจำลอง (Plant / Model Mismatch) ได้ เนื่องจากมีการประมาณค่าสเตทและพารามิเตอร์

3.3 การจูนสำหรับการควบคุมแบบจีเอ็มซี

การจูนสำหรับการควบคุมแบบจีเอ็มซี คือการเลือกค่า K_1 และ K_2 ที่เหมาะสมตามที่กำหนดในสมการ 3-11 และ 3-12 โดยพบว่าการเลือกค่า K_1 และ K_2 ที่เหมาะสมจะทำให้การควบคุมมีสมรรถนะของการควบคุมที่ดี

ดังนั้นจึงมีการกำหนดหลักการเลือกค่า K_1 และ K_2 เพื่อใช้ในการคำนวณค่าตัวแปรปรับเพื่อควบคุมตัวควบคุมหรือกระบวนการให้ผลการควบคุมได้ตามต้องการ โดยกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างสมการจีเอ็มซีและค่า K_1 และ K_2 ให้อยู่ในรูป ξ และ τ ได้ตามสมการข้างล่างนี้

$$K_1 = \frac{2\xi}{\tau} \qquad (3\text{-}13)$$

$$K_2 = \frac{1}{\tau^2} \qquad (3\text{-}14)$$

หลักการปรับค่าตัวแปรปรับเพื่อให้ผลการควบคุมได้ตามต้องการ

1. เลือก ξ เพื่อให้ได้การตอบสนองตามที่ต้องการ โดยกำหนดเวลาที่ต้องการให้ผลการตอบสนองเข้าสู่อุณหภูมิเซ็ตพอยต์
2. เลือก τ เพื่อให้ได้จังหวะเวลาที่เหมาะสมและสอดคล้องกับความเร็วของการตอบสนองของกระบวนการ
3. คำนวณค่า K_1 และ K_2 ตามสมการ 3-13 และ 3-14

3.4 การประยุกต์ใช้การควบคุมแบบจีเอ็มซี

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน นั้นส่วนใหญ่มีแบบจำลองของกระบวนการแบบไม่เป็นเชิงเส้นสูง และการดำเนินงานของระบบอาจเข้าสู่จุดที่ระบบไม่มีเสถียรภาพ ดังนั้นจึงมีความต้องการเทคนิคการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งมีความทนทานและสามารถประยุกต์ใช้งานจริง

Cott และ Macchietto (1989) กล่าวถึงการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตซ์ที่เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนโดยใช้การควบคุมแบบจีเอ็มซี โดยมีสมมติฐานที่ต้องคำนึงถึงคือสามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีและปฏิกิริยาเกิดขึ้นในเฟสของเหลว ซึ่งการควบคุมกระบวนการคือการ

เริ่มให้ความร้อนแก่เครื่องปฏิกรณ์แบบแบตซ์จากอุณหภูมิบรรยากาศถึงอุณหภูมิเซ็ตพอยต์ที่กำหนดและควบคุมให้อุณหภูมิคงที่ และกำหนดสมการอนุรักษ์มวลสารในเครื่องปฏิกรณ์ สมการอนุรักษ์พลังงานรอบเครื่องปฏิกรณ์ และสมการอนุรักษ์พลังงานของน้ำในแจ็คเก็ต

โดยพบว่าตัวแปรปรับของการควบคุมคืออุณหภูมิของแจ็คเก็ตสามารถวัดค่าได้จากกระบวนการเพื่อใช้คำนวณเซ็ตพอยต์ของเครื่องปฏิกรณ์และคำนวณหาค่าอุณหภูมิเซ็ตพอยต์ของแจ็คเก็ตได้

3.4.1 การประมาณค่าความร้อนสำหรับการควบคุมแบบจีเอ็มซี

ความสำเร็จของการใช้กับการควบคุมแบบจีเอ็มซีในการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์นั้นขึ้นกับความสามารถในการวัดและการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาทุก ๆ คาบเวลา ซึ่ง Juba และ Hamer (1986) ได้อธิบายการประมาณค่าความร้อนโดยเทคนิคต่าง ๆ ดังนี้

1. ใช้รายละเอียดโดยตรงของแบบจำลองทางจลนศาสตร์ (Kinetic Model)
2. กำหนดดุลพลังงานออนไลน์
3. สังเกตและทดลองประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา

ระบบของปฏิกิริยาส่วนใหญ่ที่สนใจในอุตสาหกรรม ถ้าพิจารณาจากการใช้แบบจำลองทางจลนศาสตร์โดยตรงพบว่าในการประมาณค่าความร้อนไม่สามารถเป็นไปได้ ซึ่งอาจเกิดจากแบบจำลองทางจลนศาสตร์บกพร่อง เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีเกิดเร็วหรือช้าเกินไปทำให้ไม่สามารถวัดได้

พิจารณาการกำหนดดุลพลังงานออนไลน์ พบว่าปัญหาที่พบบ่อยคือการที่สมมติให้ความร้อนที่ผนังของเครื่องปฏิกรณ์มีค่าน้อย แต่เมื่อค่าความจุความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์มีค่าไม่น้อยพอที่จะละเลยได้นั้น กำหนดสมดุลพลังงานต้องคำนึงถึงอุณหภูมิที่ผนังของเครื่องปฏิกรณ์ด้วย ทำให้จำนวนพารามิเตอร์ของกระบวนการเพิ่มขึ้น และการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาทำได้ยากขึ้น

3.4.2 การประมาณค่าความร้อนออนไลน์ร่วมกับการควบคุมแบบจีเอ็มซี (On-Line Estimation of the Heat Released for the GMC Controller)

Cott และ Macchietto (1989) ศึกษาการประมาณค่าความร้อนออนไลน์ร่วมกับการควบคุมแบบจีเอ็มซีโดยการกำหนดดุลพลังงานเครื่องปฏิกรณ์ การลดปัญหาที่เกิดขึ้นโดยเลือกการประมาณค่าความร้อนในเทอม Q/UA เพื่อทำให้พารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าน้อยลง โดยการรวมพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าไว้เป็นกลุ่มเดียวกันในเทอม WC_p/UA จากสมการอนุรักษ์พลังงานรอบเครื่องปฏิกรณ์ พบว่าอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และอุณหภูมิของแจ็คเก็ต สามารถวัดได้โดยตรงแต่เนื่องจากเทอมอนุพันธ์ของอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ไม่สามารถวัดค่าได้ จึงต้องมีการประมาณค่าความร้อนออนไลน์จากอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ (T_r) ที่วัดได้ โดยวิธีการอนุพันธ์เชิงตัวเลข (Numeric Differentiation) ซึ่งมีความว่องไวต่อความผิดพลาดจากการวัดสูงมาก แต่สามารถหลีกเลี่ยงโดยการใช้สมการอนุพันธ์อันดับสูง (High-order Differentiation Equation) ซึ่งในกรณีนี้จะใช้สมการความแตกต่างอันดับ 3 และตัวกรองเอกซ์โปรแนนเชียลกับเวลาคงที่ทุก ๆ 1 นาที โดยการวัดอุณหภูมิและการประมาณค่า Q/UA

การประมาณค่าความร้อนออนไลน์ เพื่อใช้ประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาสามารถประยุกต์ใช้กับปฏิกิริยาหรือเครื่องปฏิกรณ์แบบใดก็ได้ การทดสอบประสิทธิภาพของการประมาณค่าความร้อนพบว่าค่าความร้อนที่เกิดจากการประมาณค่าความร้อนออนไลน์ พบว่าความร้อนที่ประมาณได้ใกล้เคียงกับค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจริง เนื่องจากไม่มีผลกระทบจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น