

บทที่ 4

การออกแบบตัวควบคุมคอนทนต์

และการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมคอนทนต์ชนิดติดตามการควบคุมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะเริ่มจากการทดสอบหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากนั้นทำการออกแบบตัวควบคุมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งต้องอาศัยแบบจำลองในการออกแบบ ดังนั้นในขั้นตอนนี้จะเป็นการออกแบบโดยไม่พิจารณาความไม่แน่นอนของพลาเน็ต และการเปลี่ยนแปลงของโหลด แต่จะเป็นการออกแบบตัวควบคุมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อบรรลุสมรรถนะในการติดตามสัญญาณอ้างอิง และการออกแบบตัวควบคุมปรับแก้ชนิดพีไอดี จะเป็นการอาศัยเงื่อนไขการติดตามแบบจำลองอย่างสมบูรณ์แบบ และใช้กรณีเลวที่สุดของพลาเน็ตในการออกแบบเพื่อบรรลุเงื่อนไขให้เกิดสมรรถนะของความคอนทนต์ต่อความไม่แน่นอน ซึ่งการออกแบบที่แยกอิสระต่อกันระหว่างตัวควบคุมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และตัวปรับแก้ชนิดพีไอดี ซึ่งจะชี้ให้เห็นว่าไม่มีการรบกวนที่เกี่ยวข้องกันระหว่างการออกแบบทั้งสอง ดังนั้นสิ่งนี้จึงเป็นข้อดีที่เด่นชัดของการควบคุมคอนทนต์ชนิดติดตามการควบคุมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

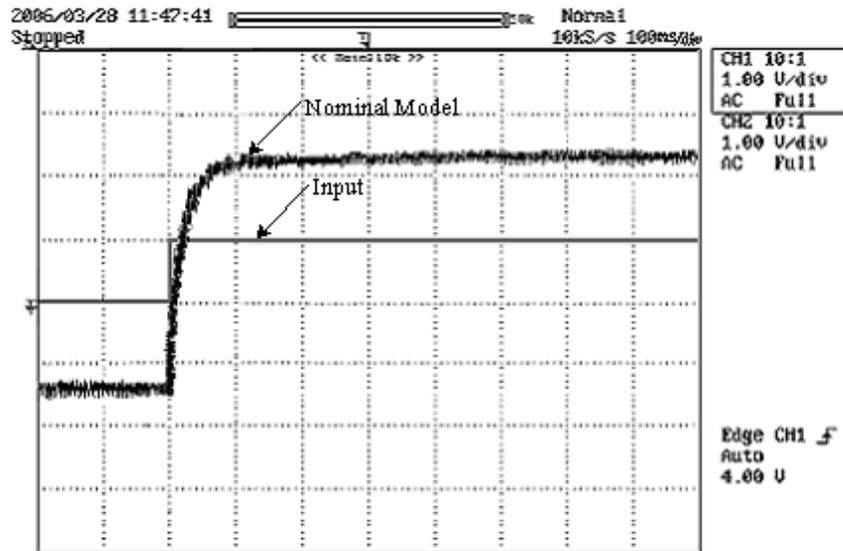
ผลจากการทดสอบแบบจำลองที่ได้ในแต่ละส่วน จะทำการอ้างอิงผลกับการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อประกันให้เป็นที่ไปในแนวทางเดียวกันกับสิ่งที่ทำการทดสอบได้ และต่อมาจะกล่าวถึงการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งสมรรถนะของการออกแบบตัวควบคุมคอนทนต์ชนิดติดตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะแสดงไว้ในส่วนของผลการทดลอง

4.1 การออกแบบตัวควบคุมคอนทนต์ชนิดติดตามการควบคุมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง การออกแบบตัวควบคุมคอนทนต์ชนิดติดตามการควบคุมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยเริ่มจากการทดสอบหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การออกแบบตัวควบคุมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการออกแบบตัวควบคุมปรับแก้ชนิดพีไอดี เพื่อนำส่วนต่างๆ มาประกอบรวมเป็นโครงสร้าง ของตัวควบคุมคอนทนต์ชนิดติดตามการควบคุมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และจากผลการทดสอบที่ได้จะทำการอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรม MATLAB

4.1.1 การทดสอบเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การทดสอบเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของพลานท์การควบคุมดิซีมอเตอร์ ซึ่งอยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับหนึ่ง ทำโดยการป้อนสัญญาณทดสอบแบบขั้นบันไดด้วยแรงดันขนาด 1 โวลต์ให้กับพลานท์การควบคุมดิซีมอเตอร์ (ซึ่งได้อ้างอิงวิธีการทดสอบไว้ในหัวข้อที่ 2.2) แล้ววัดผลตอบสนองซึ่งจะได้ผลตอบสนองดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ผลตอบสนองลูปเปิดของพลานท์การควบคุมตำแหน่งของดิซีมอเตอร์

จากผลตอบสนองในรูปที่ 4.1 เมื่อป้อนสัญญาณทดสอบแบบขั้นบันไดด้วยแรงดันขนาด 1 โวลต์ สามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของพลานท์การควบคุมดิซีมอเตอร์ ได้จากทฤษฎีการหาฟังก์ชันถ่ายโอน (แสดงไว้ในหัวข้อที่ 2.2) มีสมการดังต่อไปนี้

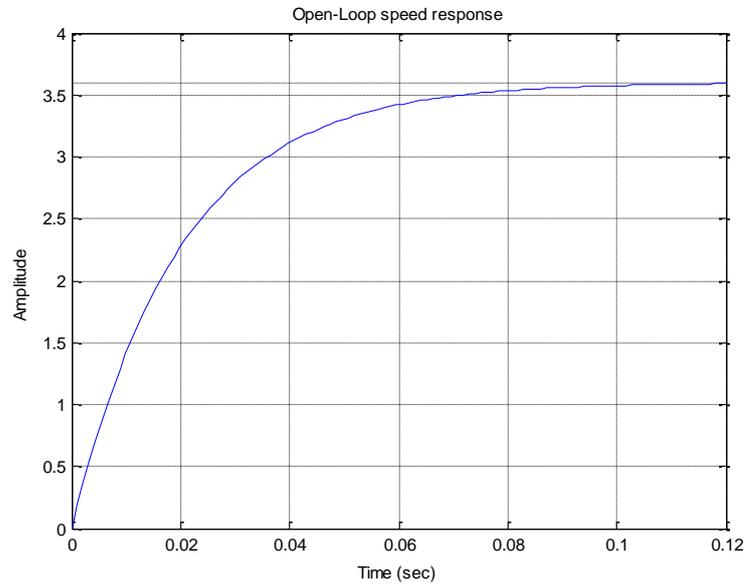
$$G_m(s) = \frac{K'_m}{\tau'_m s + 1} = \frac{3.6}{0.02s + 1} \quad (4.1)$$

เมื่ออ่านค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของพลานท์ได้แทนค่าลงในสมการต่อไปนี้

$$K'_m = \frac{\text{Output}}{\text{Input}} = \frac{14.5}{4} = 3.6 \quad (4.2)$$

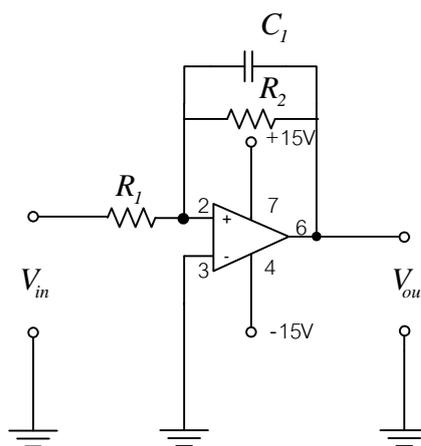
$$\tau'_m = 0.02 \quad (4.3)$$

จากค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จำลองด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งจะได้ผลตอบสนองดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ผลตอบสนองรูปเปิดของพลาเน็ตจากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB

และจากผลตอบสนองของการทดสอบหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เราสามารถที่จะออกแบบการจำลองพลาเน็ตการควบคุมดีซีมอเตอร์ด้วยออปแอมป์ ซึ่งอยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับหนึ่งแบบแอกทีฟโลพาสฟิลเตอร์ (Active Low Pass Filter) โดยมีวงจรแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 วงจรอันดับหนึ่งของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากรูปที่ 4.3 จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{R_2 C_1 s + 1} \quad (4.4)$$

เราสามารถที่จะหาค่าอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้จากสมการพื้นฐานดังต่อไปนี้

ค่าคงที่ของมอเตอร์ $K'_m = \frac{R_2}{R_1} \quad (4.5)$

และค่าเวลาคงตัวของมอเตอร์ $\tau'_m = R_2 C_1 \quad (4.6)$

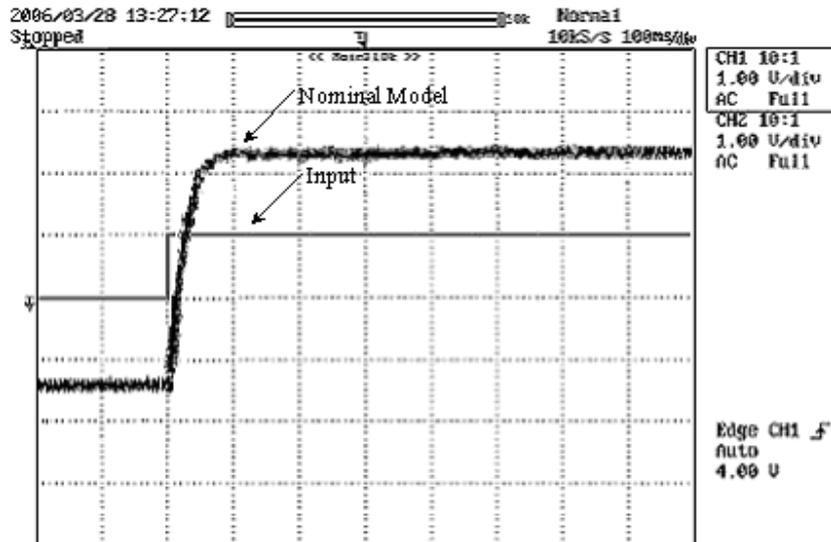
และจากการออกแบบจะกำหนดค่าของตัวคาปาซิเตอร์ $C_1 = 10 \mu F$ จะได้ค่าของ R_1 และ R_2 จากการคำนวณตามสมการข้างต้นดังนี้

$$R_2 = \frac{\tau'_m}{C_1} = \frac{0.02}{10 \times 10^{-6}} = 2k\Omega \quad (4.7)$$

และ

$$R_1 = \frac{R_2}{K'_m} = \frac{2 \times 10^3}{3.6} = 555.5\Omega \quad (4.8)$$

จากนั้นทำการทดสอบผลตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่จำลองด้วยออปแอมป์โดยการป้อนสัญญาณทดสอบแบบขั้นบันไดด้วยแรงดันขนาด 1 โวลต์ ทำการวัดผลตอบสนองจะได้ผลตอบสนองดังแสดงในรูปที่ 4.4 และจะพบว่าผลตอบสนองมีความคล้ายคลึงกันกับต้นแบบที่ได้จำลองไว้เบื้องต้น ซึ่งสามารถที่จะประกันได้ว่าการจำลองด้วยออปแอมป์สามารถที่จะทำงานแทนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้



รูปที่ 4.4 ผลตอบสนองรูปเปิดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จำลองด้วยออปแอมป์

4.1.2 การออกแบบตัวควบคุมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เมื่อได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการออกแบบตัวควบคุมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งตัวควบคุมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถออกแบบด้วยวิธีใดก็ได้ โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเลือกวิธีการออกแบบด้วยตัวควบคุมพีไอดี ซึ่งเป็นตัวควบคุมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม และมีโครงสร้างที่ง่ายต่อการสร้างและการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ โดยข้อกำหนดต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบคือ

Settling time $\leq 0.08\text{sec.}$

Maximum overshoot $\leq 20\%$

และจากสมการ
$$\zeta \geq \frac{-\ln(\%mp/100)}{\sqrt{\pi^2 + (\ln(\%mp/100))^2}} \quad (4.9)$$

แทนค่าจากข้อกำหนดต่างๆ จะได้
$$\zeta \geq 0.456 \quad (4.10)$$

และ
$$\alpha = \cos^{-1} \zeta \quad (4.11)$$

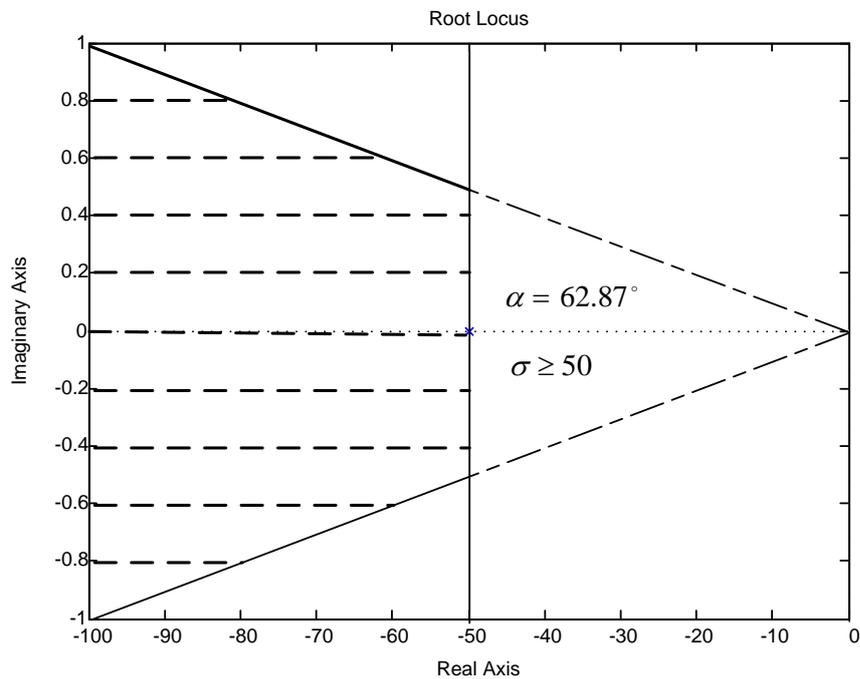
จะได้
$$\alpha = 62.87^\circ \quad (4.12)$$

และจุดตัดบนแกนจริง
$$\sigma = \zeta\omega_n \geq \frac{4}{ts} \quad (4.13)$$

จากข้อกำหนดที่ *Settling time* ≤ 0.08 sec. จะได้

$$\sigma \geq 50 \quad (4.14)$$

ทำการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB จะได้ตำแหน่งของโพลคู่ปิดหลัก ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ตำแหน่งของโพลคู่ปิดหลัก

จากรูปที่ 4.5 จะพบว่า ส่วนที่มีความเสถียรภาพทางสมรรถนะจะอยู่ทางด้านซ้ายของระนาบและที่ได้ทำการแรงเงา คือ $\sigma \geq 50$ โดยเทคนิคในการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี ทางโดเมนเวลานั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี โดยในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้วิธีการออกแบบเชิงวิเคราะห์ (Analytical Design)[5] ซึ่งเป็นวิธีที่ต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของพลานต์ โดยการเริ่มจากการเลือกตำแหน่งของโพลคู่ปิดหลัก s_1 ให้สอดคล้องกับข้อกำหนดต่างๆ โดยผู้ออกแบบผู้ออกแบบดังสมการต่อไปนี้

$$s_1 = |s_1| e^{j\beta} \quad (4.15)$$

และ

$$G_p(s_1)H(s_1) = |G_p(s_1)H(s_1)| e^{j\psi} \quad (4.16)$$

ซึ่งจะได้สมการเพื่อหาค่า K_p และ K_D ดังนี้

$$K_p = \frac{-\sin(\beta + \psi)}{|G_p(s_1)H(s_1)| \sin \beta} - \frac{2K_I \cos \beta}{|s_1|} \quad (4.17)$$

$$K_D = \frac{-\sin \psi}{|s_1| |G_p(s_1)H(s_1)| \sin \beta} + \frac{K_I}{|s_1|^2} \quad (4.18)$$

โดยทำการเลือกค่า K_I ที่ค่าต่างๆ จนได้ผลตอบสนองตามข้อกำหนดที่วางไว้ โดยจะได้ตำแหน่งโพลคู่ปิดหลักที่สอดคล้องกับข้อกำหนดต่างๆ ทางสมรรถนะตามสมการข้างต้น

จากนั้นเราทำการเลือกตำแหน่งของโพลคู่ปิดหลัก s_1 ให้สอดคล้องกับข้อกำหนดโดยเลือกโพลคู่ปิดหลักที่ตำแหน่ง $s_1 = -54 + j37$ ดังนี้

$$s_1 = |s_1| e^{j\beta} = -54 + j37 = 64.46 e^{j145.58} \quad (4.19)$$

และ

$$\begin{aligned} G_p(s_1)H(s_1) &= |G_p(s_1)H(s_1)| e^{j\psi} = \frac{3.6}{-0.08 + j0.74} \\ &= 4.84 \angle -96.17 \end{aligned} \quad (4.20)$$

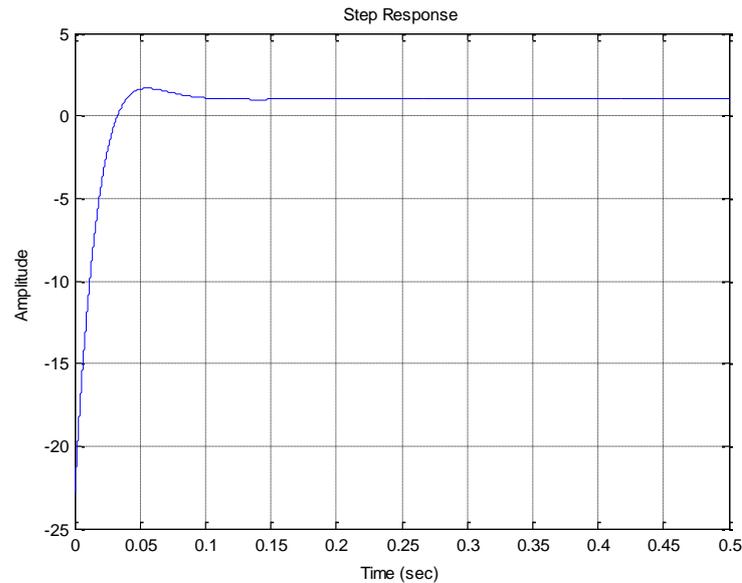
และจากนั้นเลือก $K_I = 1$ จะได้ $\beta = 145.58$ และ $\psi = -96.17$ ดังนี้

$$\begin{aligned} K_p &= \frac{-\sin(\beta + \psi)}{|G_p(s_1)H(s_1)| \sin \beta} - \frac{2K_I \cos \beta}{|s_1|} = \frac{-\sin(49.41^\circ)}{4.84 (\sin 145.58^\circ)} - \frac{2(\cos 145.58^\circ)}{64.46} \\ &= -0.2776 + 0.026 = -0.2516 \end{aligned} \quad (4.21)$$

$$K_D = \frac{-\sin \psi}{|s_1| |G_p(s_1)H(s_1)| \sin \beta} + \frac{K_I}{|s_1|^2} = \frac{-\sin(-96.17^\circ)}{64.46 \times 4.84 (\sin 145.58^\circ)} + \frac{1}{4155.09}$$

$$= -0.0092 + 0.00024 = -0.0089 \quad (4.22)$$

จากการออกแบบและคำนวณด้วยมือพบว่า เมื่อเลือกค่าพารามิเตอร์ $K_I = 1$ จะทำให้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม $K_P = -0.2516$ และ $K_D = -0.0089$ มีค่าติดลบ และเมื่อทำการจำลองผลด้วยโปรแกรม MATLAB ได้ผลตอบสนองดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลตอบสนองเมื่อ $K_I = 1$

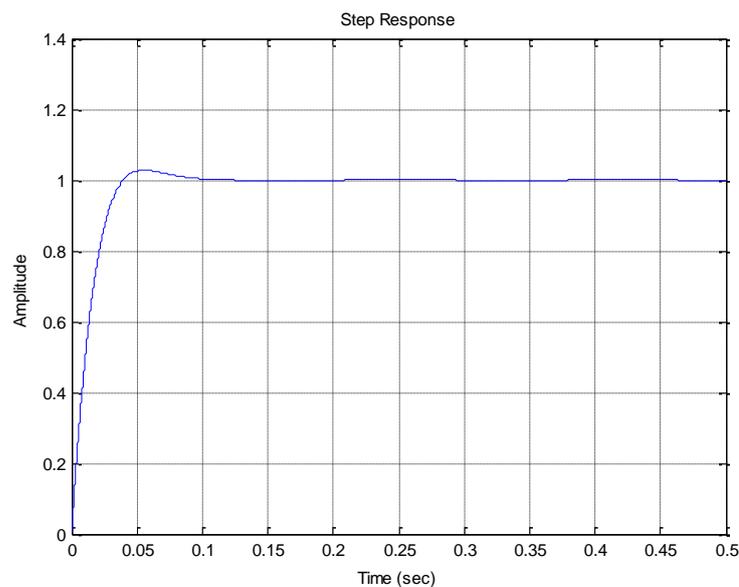
จากรูปที่ 4.6 จะพบว่าจากกราฟผลตอบสนองโดยการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB ผลตอบสนองที่ได้มีค่าติดลบจะเห็นได้ว่าถ้าใช้ค่าของ $K_I = 1$ จะทำให้ค่าของ K_P และ K_D มีค่าเป็นลบซึ่งจะใช้ในการควบคุมพลานต์ของมอเตอร์ไม่ได้ เนื่องจากผลตอบสนองที่ได้จากการจำลองมีช่วงเวลาในการไต่ระดับชั่วขณะ แล้วสัญญาณก็ตกลงมาเป็นศูนย์ ดังนั้นจึงต้องทำการคำนวณใหม่ แต่เพื่อลดระยะเวลาในการคำนวณด้วยมือและหากกราฟผลตอบสนอง เราทำการใช้โปรแกรม MATLAB เข้ามาช่วยในการคำนวณและหาผลตอบสนอง ซึ่งจากการเขียนโปรแกรม จะมีโครงร่างดังนี้

```

Editor - C:\Progra-1\MATLAB7\work\Design.m*
File Edit Text Cell Tools Debug Desktop Window Help
1 - KI=[1];
2 - Gp=tf([0.7],[1.77 1]);
3 - s1=-54+j*37;
4 - beta=angle(s1);
5 - slmag=abs(s1);
6 - Gps1=evalfr(Gp,s1);
7 - psi=angle(Gps1);
8 - Gpslmag=abs(Gps1);
9 - t=0:0.0001:0.5;
10 - KP=-sin(beta+psi)/(Gpslmag*sin(beta))-2*KI*cos(beta)/slmag;
11 - KD=sin(psi)/(slmag*Gpslmag*sin(beta))+KI/slmag^2;
12 - Gc=tf([KD KP KI],[0 1 0]);
13 - T=Gc*Gp/(1+Gc*Gp);
14 - P=pole(T),z=zero(T)
15 - [KP KI KD]
16 - step(T,t)
17 - grid
script Ln 1 Col 6 OVR

```

จากการออกแบบโดยใช้โปรแกรม MATLAB ที่สร้างขึ้นเข้าช่วยในการคำนวณและหาผลตอบสนอง โดยยังเลือกตำแหน่งโพลลูบปิดหลักที่จุด $s_1 = -54 + j37$ เราสามารถแทนค่า K_I ด้วยวิธีการสุ่มค่าจากโปรแกรม MATLAB เพื่อหาผลตอบสนองของพารามิเตอร์ให้เป็นไปตามข้อกำหนดและเงื่อนไขทางสมรรถนะ ซึ่งเมื่อเลือกค่าพารามิเตอร์สุดท้ายของ $K_I = 24.00$ จะพบว่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม $K_p = 0.3271$ และ $K_D = 0.00$ ซึ่งไม่ติดลบและสามารถควบคุมได้จริง และใช้โปรแกรม MATLAB ทำการจำลองผลตอบสนองที่สามารถควบคุมได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.7



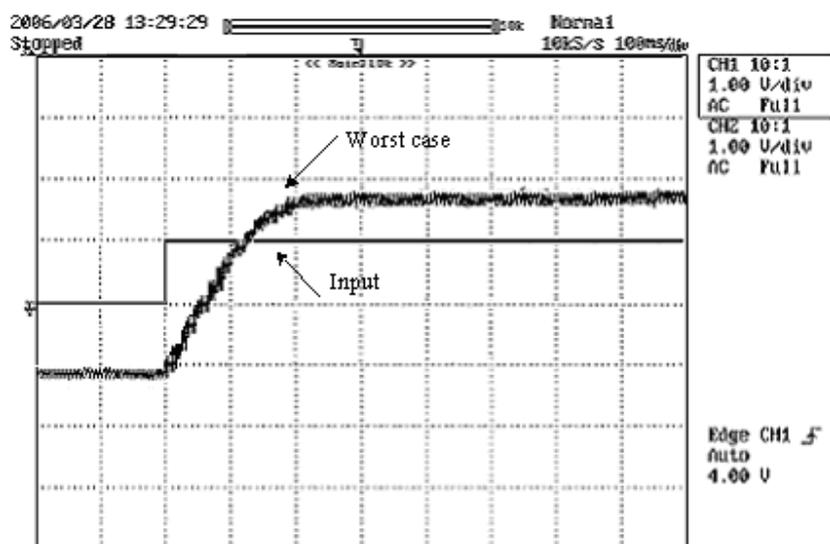
รูปที่ 4.7 ผลตอบสนองของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบได้

จากรูปที่ 4.7 เมื่อโปรแกรม MATLAB ทำการคำนวณและหาผลตอบสนองของพารามิเตอร์ที่เป็นไปตามเงื่อนไขทางสมรรถนะ เราจะสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมพีไอดี จากการทดสอบหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้เป็นตัวควบคุมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงได้ดังโครงสร้างของฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีอัตราขยายของตัวควบคุม $K_p = 0.3271$, $K_I = 24$, $K_D = 0.00$ โดยสมการตัวควบคุมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เขียนในรูปของสมการฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีอัตราขยายคือ

$$G_c = 0.3271 + \frac{24}{s} + 0.0s \quad (4.23)$$

4.1.3 การทดสอบเพื่อหาตัวควบคุมปรับแก้ชนิดพีไอดีภายใต้เงื่อนไขความไม่แน่นอนกรณีเลวที่สุด

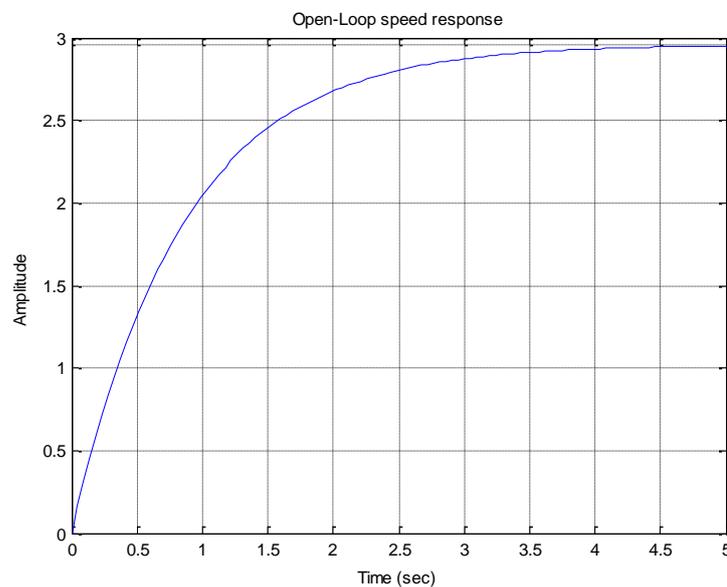
การทดสอบเพื่อหาผลตอบสนองของพลาการควบคุมดิซิมูเตอร์ เมื่อเกิดความไม่แน่นอนกรณีเลวที่สุด วัตถุประสงค์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของพลาการควบคุม แล้วนำค่าที่หาได้ไปออกแบบตัวควบคุมปรับแก้ชนิดพีไอดี ซึ่งผลตอบสนองของพลาการจะอยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับหนึ่งทำได้โดยการติดตั้งโหลดขนาดเท่ากับพิกัดแรงดันของมอเตอร์เข้าที่แกนเพลลา จากนั้นป้อนสัญญาณทดสอบแบบขั้นบันไดด้วยแรงดันขนาด 1 โวลต์ให้กับพลาการควบคุม ซึ่งจะได้ผลตอบสนองด้านเอาต์พุตเทียบกับสัญญาณด้านอินพุตของพลาการ ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับหนึ่ง ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ผลตอบสนองลูปเปิดของพลาการที่มีความไม่แน่นอนกรณีเลวที่สุด

จากผลตอบสนองในรูปที่ 4.8 เมื่อป้อนสัญญาณทดสอบแบบขั้นบันไดด้วยแรงดันขนาด 1 โวลต์ สามารถหาค่าเวลาคงตัวทางเวลา τ_m' ได้จากการหาช่วงเวลาที่ผลการตอบสนอง หรือเอาต์พุตของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึง 63.2% ของค่าสุดท้ายของเอาต์พุต และหาค่าอัตราขยายของพลาเน็ต K_m' ได้จากการหารเอาต์พุตที่ค่าสุดท้ายด้วยอินพุตอ้างอิงแล้วเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนได้จากสมการที่ (4.24)

$$G_m(s, \Delta) = \frac{K_m'}{\tau_m' s + 1} = \frac{2.96}{0.85s + 1} \quad (4.24)$$



รูปที่ 4.9 ผลตอบสนองรูปเปิดของพลาเน็ตจากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB

จากค่าพารามิเตอร์จากการทดสอบกระบวนการ นำมาทดสอบเพื่อเปรียบเทียบด้วยการจำลองด้วยโปรแกรมทางวิศวกรรม จะได้ผลตอบสนองดังรูปที่ 4.9

และในหัวข้อนี้ จะทำการออกแบบตัวควบคุมปรับแก้ชนิดพีไอดีสำหรับพลาเน็ตที่มีความไม่แน่นอนกรณีเลวที่สุด ซึ่งจะใช้ข้อกำหนดเดิมจากการออกแบบตัวควบคุมแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB ในหัวข้อที่ผ่านมา และทำการเลือกโพลูปิดหลัก $s_1 = -59 + j55$ ดังนั้น

$$s_1 = |s_1| e^{j\beta} = -59 + j55 = 80.65 e^{j137} \quad (4.25)$$

และ

$$G_p(s_1)H(s_1) = |G_p(s_1)H(s_1)| e^{j\psi} = \frac{2.96}{-49.15 + j46.75}$$

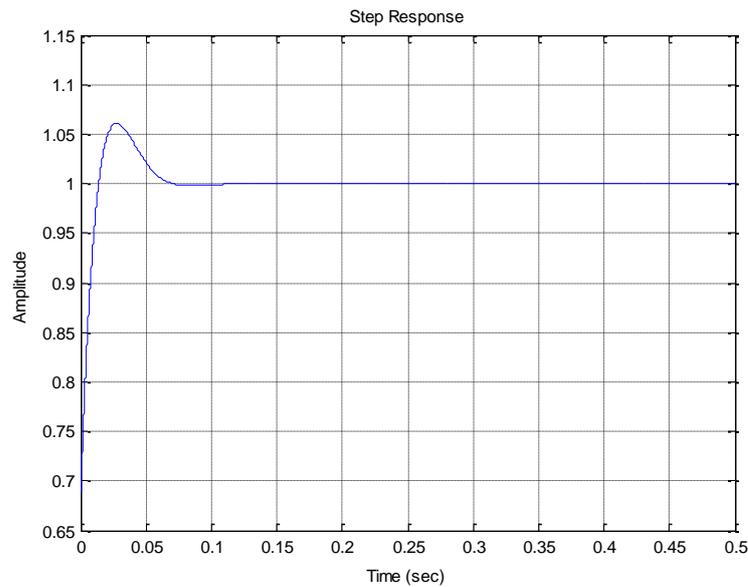
$$= 0.0436 \angle -136.433 \quad (4.26)$$

และจากนั้นเลือก $K_I = 1$ จะได้ $\beta = 137$ และ $\psi = -136.433$ ดังนั้น

$$\begin{aligned} K_p &= \frac{-\sin(\beta + \psi)}{|G_p(s_1)H(s_1)|\sin\beta} - \frac{2K_I \cos\beta}{|s_1|} = \frac{-\sin(9.147^\circ)}{0.0436(\sin 145.58^\circ)} - \frac{2(\cos 145.58^\circ)}{80.65} \\ &= -6.462 - 0.020 = -6.482 \end{aligned} \quad (4.27)$$

$$\begin{aligned} K_D &= \frac{-\sin\psi}{|s_1||G_p(s_1)H(s_1)|\sin\beta} + \frac{K_I}{|s_1|^2} = \frac{\sin(-136.433^\circ)}{80.65 \times 0.0436(\sin 145.58^\circ)} + \frac{1}{6504.42} \\ &= -0.3467 + 0.00015 = -0.3465 \end{aligned} \quad (4.28)$$

จากข้อกำหนดทางสมรรถนะ โดยเลือกตำแหน่งโพลคู่ปิดหลักที่จุด $s_1 = -59 + j55$ และทำการออกแบบโดยใช้โปรแกรม MATLAB เข้าช่วยจะพบว่าเมื่อเลือกค่า $K_I = 1$ ทำให้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมมีค่าติดลบดังนั้นจึงใช้โปรแกรม MATLAB เข้ามาช่วยในการคำนวณและหาผลตอบสนองและเมื่อเลือกพารามิเตอร์สุดท้ายของ $K_I = 6000$ จะได้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมปรับแก้ชนิดพีไอดี ดังนี้ $K_p = 108.5$ $K_I = 6000$ $K_D = 0.6$ จากนั้นใช้โปรแกรม MATLAB ทำการจำลองผลของระบบจะได้ผลตอบสนองของพลานต์ที่มีความไม่แน่นอนกรณีเลวที่สุด ซึ่งจะได้ผลตอบสนองดังรูปที่ 4.10



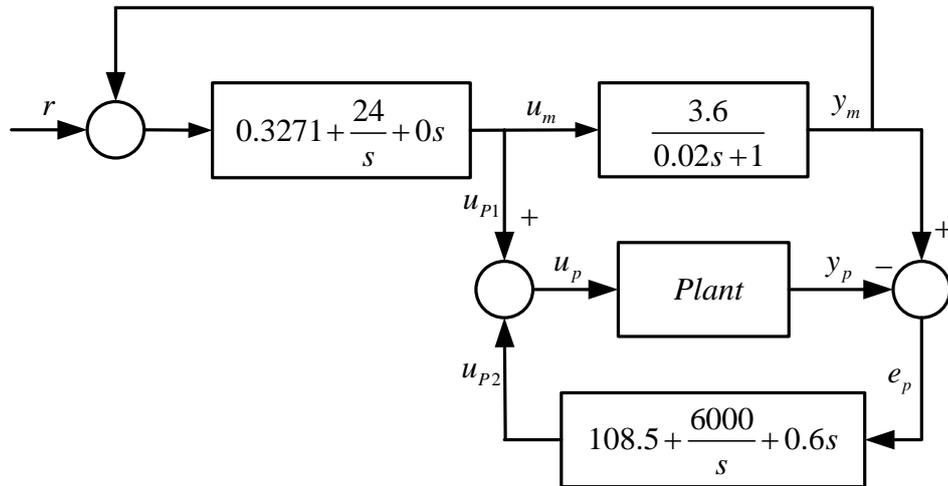
รูปที่ 4.10 ผลตอบสนองจากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB เมื่อใช้ตัวปรับแก้ชนิดพีไอดี

และจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวปรับแก้ในรูปอัตราขยายชนิดพีไอดี ดังนี้

$$G_c = 108.5 + \frac{6000}{s} + 0.6s \quad (4.29)$$

4.2 โครงสร้างของตัวควบคุมคอนทนต์ติดตามการควบคุมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากการทดสอบหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การออกแบบตัวควบคุมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การออกแบบตัวควบคุมปรับแก้ชนิดพีไอดี และจากการทดสอบจะได้ค่า พารามิเตอร์ของตัวควบคุมต่างๆ ซึ่งนำมาประกอบรวมเป็นโครงสร้างของตัวควบคุมคอนทนต์ติดตามการควบคุมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งหลักการและทฤษฎีการทำงานของโครงสร้างนี้ได้อธิบายไว้แล้วใน หัวข้อที่ 3.2 ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 4.11

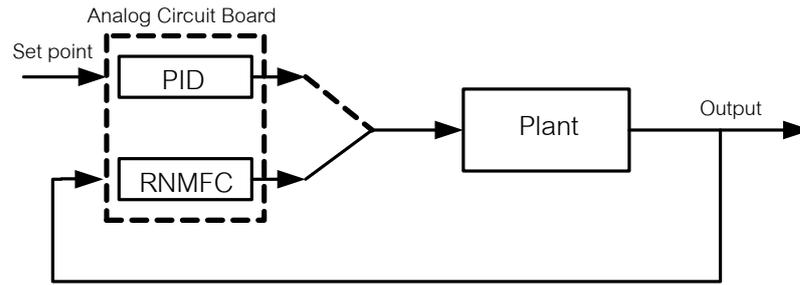


รูปที่ 4.11 โครงสร้างของตัวควบคุมคงทนชนิดติดตามการควบคุมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

หลักการการทำงานของโครงสร้างนี้จะเริ่มจาก เมื่อไม่มีค่าความผิดพลาดของสัญญาณจากพลานต์ e_y จะทำให้ลูปของสัญญาณปรับแก้ u_{p2} เท่ากับศูนย์ เพราะฉะนั้นจะมีผลให้ลูปสัญญาณออกของพลานต์ y_p เท่ากับสัญญาณออกของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ y_m แต่เมื่อมีค่าความผิดพลาดของสัญญาณจากพลานต์ e_y เกิดขึ้นทำให้ลูปของสัญญาณปรับแก้ u_{p2} ไม่เท่ากับศูนย์จะส่งผลให้สัญญาณของพลานต์จริง u_p สัญญาณการติดตามแบบจำลอง u_{p1} และสัญญาณปรับแก้ u_{p2} ไม่มีค่าเท่ากับศูนย์ไปด้วย ทำให้สัญญาณออกของพลานต์ y_p จะเท่ากับสัญญาณของพลานต์จริง u_p รวมกับสัญญาณการติดตามแบบจำลอง u_{p1} โดยที่สัญญาณปรับแก้ u_{p2} จะเพิ่มสัญญาณปรับแก้เพื่อให้สัญญาณออกของพลานต์ y_p มีหน้าที่ติดตามสัญญาณออกของแบบจำลอง y_m ต่อไป

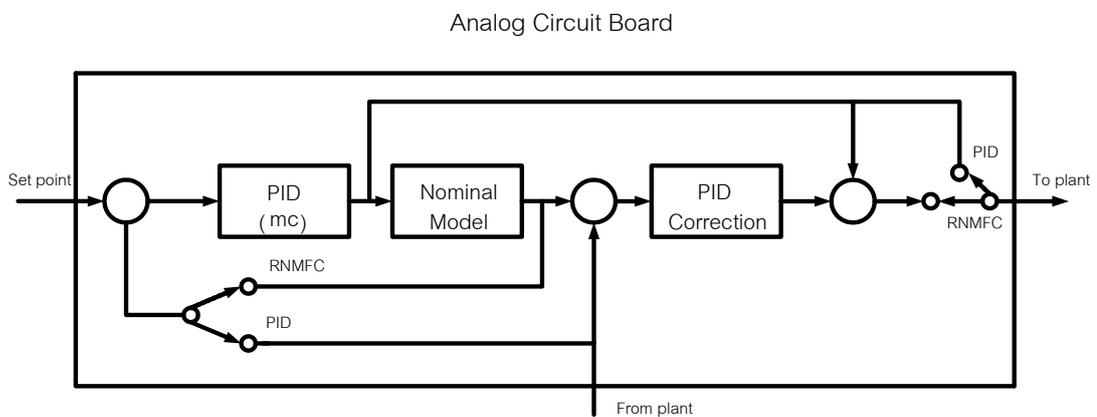
4.3 บอร์ดวงจรถอดสำหรับใช้ทดลอง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงลำดับหน้าที่ และโครงสร้างของการออกแบบบอร์ดวงจรถอดที่ใช้สำหรับการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้แล้วตามลำดับ โดยบอร์ดดังกล่าวสามารถใช้ทดสอบได้ทั้งกรณีที่เป็นโครงสร้าง ของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมที่ใช้เพียงตัวควบคุมพีไอดีเพียงอย่างเดียว และโครงสร้างของตัวควบคุมคงทนชนิดติดตามการควบคุมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งลำดับหน้าที่และโครงสร้างทางออปแอมป์ได้แสดงไว้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แล้วตามลำดับ และเพื่อทำการเปรียบเทียบผลจากการทดลอง โดยใช้หลักการเบื้องต้นของบอร์ดดังกล่าวที่แสดงได้ด้วยบล็อกไดอะแกรม ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 แนวคิดแบบบล็อกไดอะแกรมสำหรับใช้ทดลองจริง

ลักษณะโครงสร้างภายในของบอร์ดที่จะนำมาออกแบบแสดงได้ดังรูปที่ 4.13 (ดูจากภาคผนวก ก. ประกอบด้วย)



รูปที่ 4.13 โครงสร้างบอร์ดวงจรถอนาลอก

จากโครงสร้างของการออกแบบ ด้วยวงจรถอนาลอกที่ใช้สำหรับการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ นั้น เพื่ออธิบายถึงคุณภาพในด้านความถูกต้อง และความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ วิธีการวัด ดังนั้นในหัวข้อต่อไปจะเป็นการกล่าวถึงเรื่อง ความสำคัญของการใช้ความไม่แน่นอนในการวัด

4.4 การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [30, 31-33]

จากทฤษฎีพื้นฐานการประมาณค่าความไม่แน่นอนในบทที่ 3 นั้น เราสามารถนำประยุกต์เพื่ออธิบายเรื่องของการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยอ้างอิงจาก[34] ซึ่งสามารถอธิบายได้เป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1. พิจารณาขอบเขตของความไม่แน่นอนในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
- ขั้นตอนที่ 2. กำหนดค่าพารามิเตอร์พลาเน็ตระบุน
- ขั้นตอนที่ 3. การคำนวณค่าพารามิเตอร์เบี่ยงเบนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ขั้นตอนที่ 1. พิจารณาขอบเขตของความไม่แน่นอนในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากข้อมูลการทดสอบ เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของพลาเน็ตการควบคุมดีซีมอเตอร์ในสมการที่ (4.1) เมื่อทำการพิจารณาขอบเขตความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งการศึกษาได้เป็น 2 กรณีคือ

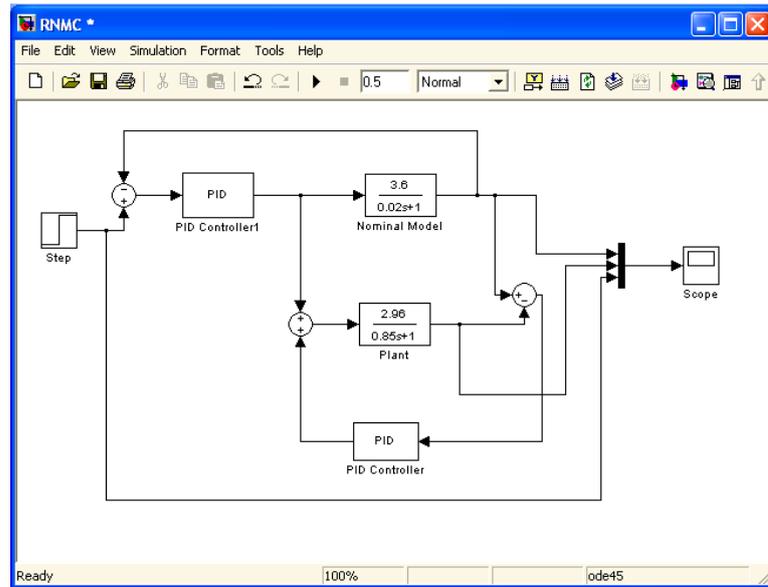
1. กรณีแปรค่าอัตราขยายของมอเตอร์ โดยกำหนดให้สมการที่ (4.1) เป็นข้อมูลที่ต้องการพิจารณาและต่อไปจะเรียกแทนว่า พลาเน็ตระบบ ที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ในขอบเขต $K'_m \in (K'_{\min}, K'_{\max})$ ซึ่งจากข้อมูลที่ต้องการพิจารณาต้องการเพิ่มขอบเขตของความไม่แน่นอนไปอีก $\pm 100\%$ เพื่อครอบคลุมค่าสูงสุดของพารามิเตอร์ และค่าต่ำสุดของพารามิเตอร์ซึ่งจะได้ขอบเขตของความไม่แน่นอนที่ต้องการพิจารณาเป็น

$$\begin{array}{c} \leftarrow \begin{array}{ccc} \overbrace{\hspace{2cm}}^{50\%} & & \overbrace{\hspace{2cm}}^{50\%} \\ K'_{\min} = 1.8 & K'_m = 3.6 & K'_{\max} = 5.4 \end{array} \rightarrow \end{array} \quad (4.29)$$

2. กรณีแปรค่าเวลาลงตัวของมอเตอร์ โดยกำหนดให้สมการที่ (4.1) เป็นข้อมูลที่ต้องการพิจารณาและต่อไปจะเรียกแทนว่า พลาเน็ตระบบ ที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ในขอบเขต $\tau'_m \in (\tau'_{\min}, \tau'_{\max})$ ซึ่งจากข้อมูลที่ต้องการพิจารณาต้องการเพิ่มขอบเขตของความไม่แน่นอนไปอีก $\pm 100\%$ เพื่อครอบคลุมค่าสูงสุดของพารามิเตอร์ และค่าต่ำสุดของพารามิเตอร์ ซึ่งจะได้ขอบเขตของความไม่แน่นอนที่ต้องการพิจารณาเป็น

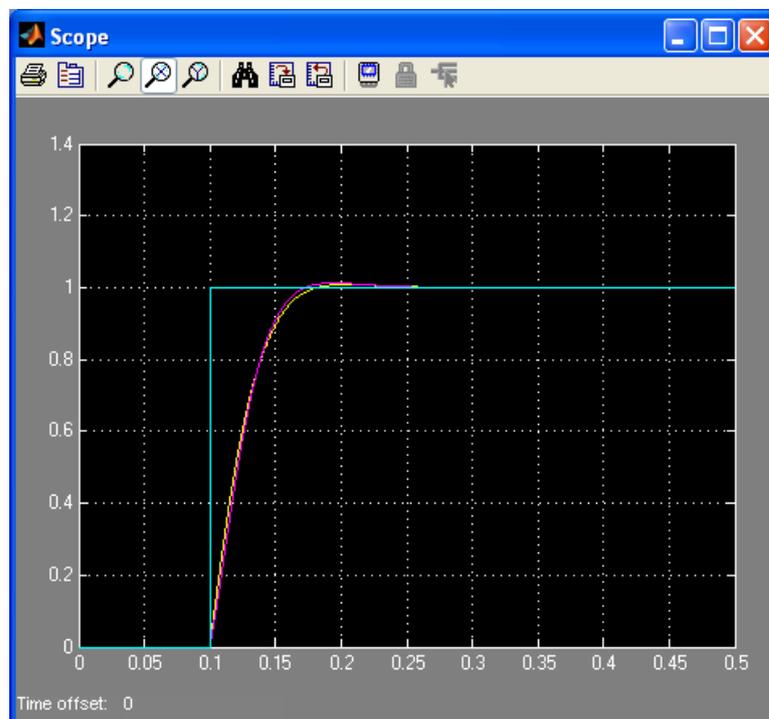
$$\leftarrow \begin{array}{ccc} \overbrace{\hspace{2cm}}^{50\%} & & \overbrace{\hspace{2cm}}^{50\%} \\ \tau'_{\min} = 0.01 & \tau'_m = 0.02 & \tau'_{\max} = 0.03 \end{array} \rightarrow \quad (4.30)$$

จากขั้นตอนที่ 1. นี้เราสามารถที่จะทำการพิจารณาความไม่แน่นอนเชิงพารามิเตอร์ได้โดยใช้โปรแกรม MATLAB ดังนี้

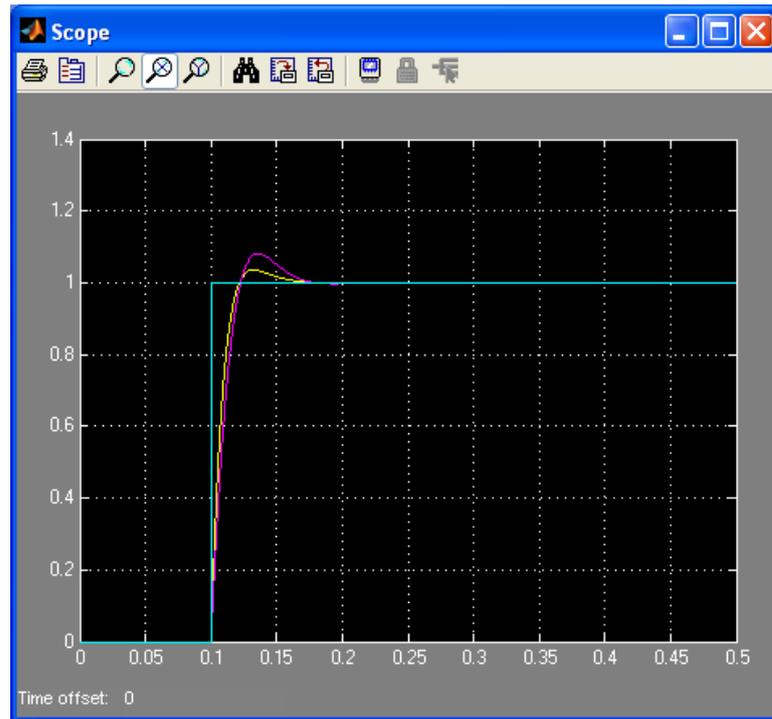


รูปที่ 4.14 โครงสร้างการควบคุมคงทนชนิดติดตามแบบจำลองโมเดลทางคณิตศาสตร์

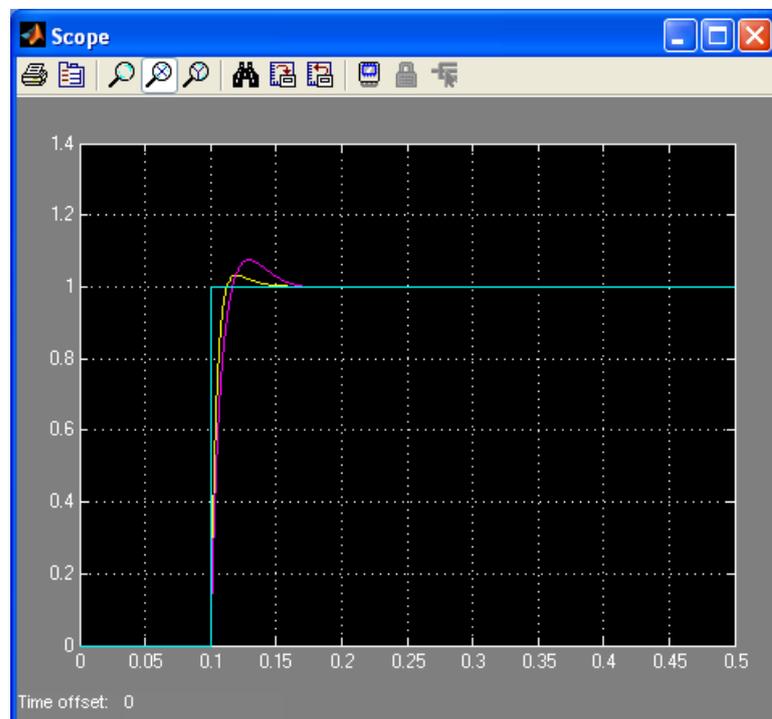
กรณีที่ 1 ทำการจำลองที่อัตราการขยายต่างๆ



รูปที่ 4.15 แสดงการจำลองที่ขอบเขตต่ำสุด $G_p(s) = \frac{1.8}{0.02s + 1}$ โดยที่ $K_m = 50\%$

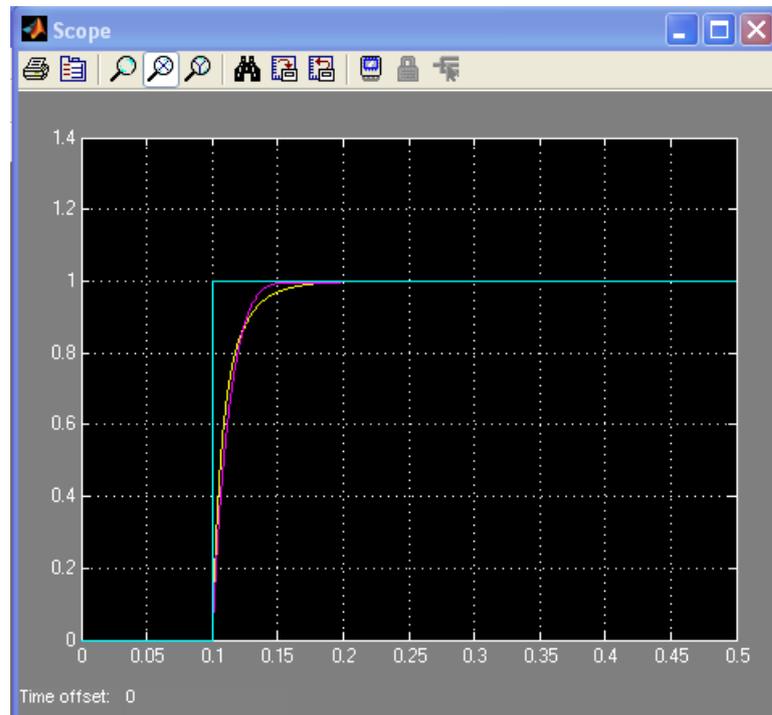


รูปที่ 4.16 แสดงการจำลองที่ขอบเขตแบนด์ราบ $G_p(s) = \frac{3.6}{0.02s+1}$



รูปที่ 4.17 แสดงการจำลองที่ขอบเขตสูงสุด $G_p(s) = \frac{5.4}{0.02s+1}$ โดยที่ $K_m = 50\%$

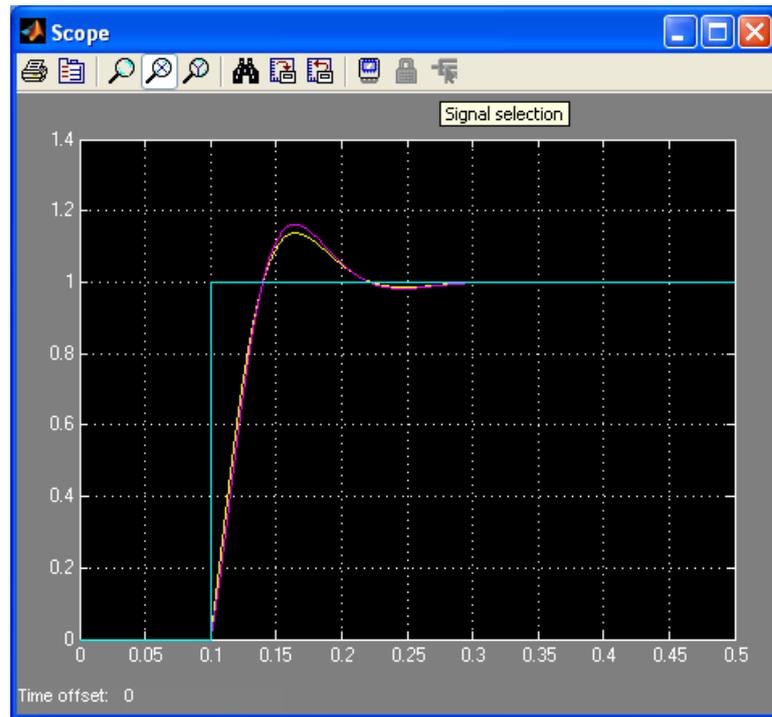
กรณีที่ 2 เป็นการจำลองที่ค่าเวลาคงตัวของมอเตอร์ที่เวลาต่าง ๆ



รูปที่ 4.18 แสดงการจำลองที่ขอบเขตต่ำสุด $G_p(s) = \frac{3.6}{0.01s+1}$ โดยที่ $\tau_m = 50\%$



รูปที่ 4.19 แสดงการจำลองที่ขอบเขตพลาตันี่ระบุ $G_p(s) = \frac{3.6}{0.02s+1}$



รูปที่ 4.20 แสดงการจำลองที่ขอบเขตสูงสุด $G_p(s) = \frac{3.6}{0.03s+1}$ โดยที่ $\tau_m = 50\%$

สรุปผลการวิเคราะห์ผลการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB

การวิเคราะห์ผลการจำลองขอบเขตความไม่แน่นอนในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าความไม่แน่นอนอยู่ในขอบเขตดังกล่าวพบว่าเมื่อทำการออกแบบ และหาพลาเนตาระบุเป็นแบบจำลองอ้างอิงนั้นผลตอบสนองของระบบดีที่สุดตามเงื่อนไขของวิธีการควบคุม เมื่อทำการขยายขอบเขตของความไม่แน่นอนออกไปหนึ่งเท่าก็ยังสามารถควบคุมได้ดี เพราะเนื่องมาจากการออกแบบตัวควบคุมที่รวมเอาความไม่แน่นอนไว้กับการออกแบบด้วย

ขั้นตอนที่ 2. กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่พลาเนตาระบุ

กรณีการเลือกค่าพารามิเตอร์ที่พลาเนตาระบุเป็นค่ากึ่งกลาง นั้นเนื่องจากต้องการควบคุมผลของสัญญาณรบกวนจากอินพุตที่มีผลต่อสัญญาณเอาต์พุตให้มีค่าน้อยที่สุด และจากสมการที่ (4.29) และ (4.30) ได้ทำการเลือกค่าพารามิเตอร์ที่พลาเนตาระบุ คือ $K'_m = 3.6$ และ $\tau'_m = 0.02$

ขั้นตอนที่ 3. การคำนวณค่าพารามิเตอร์เบี่ยงเบนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีขั้นตอนดังนี้

1. การหาค่าเฉลี่ย, \bar{X}
2. การหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, S
3. การหาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพลาตันต์ระบุ, $\sigma(\bar{X})$

เมื่อทำการพิจารณาจากรูปที่ 4.16 เราสามารถที่จะพิจารณาพารามิเตอร์เบี่ยงเบนจากแบบจำลองได้สองกรณีคือ 1. ค่าพารามิเตอร์เบี่ยงเบนไปเนื่องจากอัตราการขยายเปลี่ยนแปลงโดยอ้างอิงจากสมการที่ (4.29) 2. ค่าพารามิเตอร์เบี่ยงเบนไปเนื่องจากค่าเวลาคงตัวของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงโดยอ้างอิงจากสมการที่ (4.30)

กรณีที่ 1. การคำนวณค่าพารามิเตอร์เบี่ยงเบนไปเนื่องจากอัตราการขยายเปลี่ยนแปลง

พิจารณาจากการกำหนดขอบเขตค่าอัตราการขยายของมอเตอร์ 1.8, 3.6, 5.4

1. การหาค่าเฉลี่ย
$$\bar{X} = \frac{1.8+3.6+5.4}{3} = 3.6$$

2. การหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$S = \sqrt{\frac{(1.8-3.6)^2 + (3.6-3.6)^2 + (5.4-3.6)^2}{3-1}} = 1.8$$

3. การหาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพลาตันต์ระบุ $\sigma(\bar{X}) = 1.8/\sqrt{3} = 1.03923$

กรณีที่ 2. การคำนวณค่าพารามิเตอร์เบี่ยงเบนไปเนื่องจากค่าเวลาคงตัวของมอเตอร์เปลี่ยนแปลง

พิจารณาจากการกำหนดขอบเขตค่าเวลาคงตัวของมอเตอร์ 0.01, 0.02, 0.03

1. การหาค่าเฉลี่ย
$$\bar{X} = \frac{0.01+0.02+0.03}{3} = 0.02$$

2. การหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$S = \sqrt{\frac{(0.01-0.02)^2 + (0.02-0.02)^2 + (0.03-0.02)^2}{3-1}} = 0.01$$

3. การหาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพลาตันต์ระบุ $\sigma(\bar{X}) = 0.01/\sqrt{3} = 0.057735$