



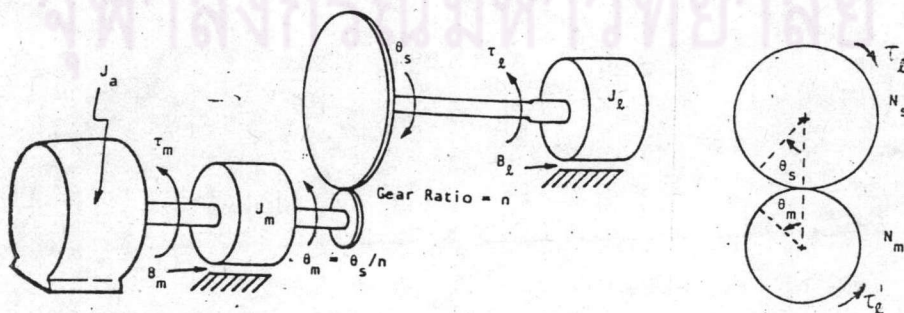
บทที่ 3

การควบคุมแบบ พี ไอ ดี

ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ส่วนมาก เป็นการควบคุมชุดขับเคลื่อนให้เคลื่อนที่ไหลไปหยุดในตำแหน่งที่กำหนด และยึดตำแหน่งนี้ไว้จนกว่าจะได้รับคำสั่งบังคับการเคลื่อนที่ใหม่ หรือเป็นการควบคุมชุดขับเคลื่อนให้เคลื่อนที่ไหลไปตามระยะตำแหน่งที่กำหนดให้ โดยอาศัยระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (feed back control) ซึ่งสามารถรักษาความแม่นยำของการเคลื่อนที่ได้ดี เพราะมีการตรวจสอบผลการเคลื่อนที่กับคำสั่งบังคับการเคลื่อนที่ สำหรับตัวขับเคลื่อนไหลนั้น เซอร์โวมอเตอร์กระแสตรงมีความเหมาะสมกับการขับเคลื่อนแกนของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดเล็ก เพราะมีคุณสมบัติที่ดีในการบังคับความเร็ว มีความเป็นเชิงเส้นดี ให้แรงบิด และมีประสิทธิภาพสูง ในโครงการวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ระบบการบังคับตำแหน่งแบบพี ไอ ดี

เซอร์โวมอเตอร์กระแสตรง

เซอร์โวมอเตอร์กระแสตรง (ต่อไปนี้จะเรียกว่ามอเตอร์) ที่ใช้กับงานหุ่นยนต์เป็นมอเตอร์ที่ถูกพัฒนาให้โพลาร์โมเมนต์ของอาเมเจอร์มีค่าน้อย มีสเตเตอร์เป็นชนิดแม่เหล็กถาวร มีขนาดเล็ก และการควบคุมมอเตอร์ควบคุมที่อาเมเจอร์ แรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้นมักถูกขยายกำลังด้วยชุดเฟืองทดซึ่งทำให้ค่าโพลาร์โมเมนต์เฉื่อยของมอเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 3.1 ระบบเฟืองทดขยายแรงบิดมอเตอร์

จากรูปที่ 3.1 ระบบเฟืองทดรอบทำให้มุมหมุน ความเร็ว ความเร่งและแรงบิด ด้านเพลามอเตอร์ ($\theta_m, \omega_m, \ddot{\theta}_m$) กับด้านเพลาก็ที่ไปต่อโหลด ($\theta_l, \omega_l, \ddot{\theta}_l$) มีค่าต่างกันตามอัตราทดของชุดเฟือง (n) ดังสมการ 3.1-3.2

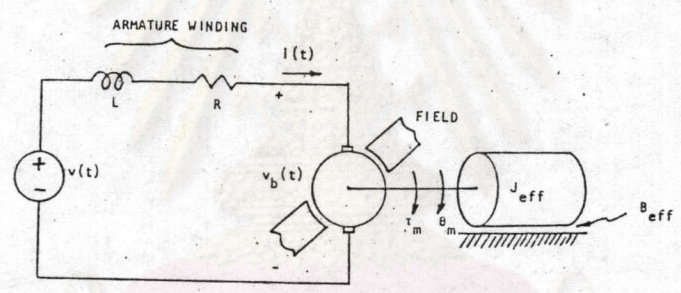
$$\theta_m = \frac{N_m}{N_l} \theta_l = n \theta_l \quad \dots 3.1$$

$$T_m = n T_l \quad \dots 3.2$$

การคำนวณแรงบิดของมอเตอร์ (T_m) เพื่อเคลื่อนที่โหลดจะอาศัยหลักการของ ดิอาเลมเบิร์ก $\Sigma \text{torque} = \Sigma (J\ddot{\theta})$ โดยที่แรงบิดของมอเตอร์ต้องมามีค่ามากกว่าอินเนอร์เซียโหลดของแกนหมุนของมอเตอร์ (J_m) ชุดเฟืองทด (J_f) และลิงค์ที่ต่อไปใช้งาน (J_l) กับแถมบึงโหลดของชุดเฟืองทด (B_m) และลิงค์ที่ต่อไปใช้งาน (B_l) ดังสมการที่ 3.3

$$T_m = (J_m + J_f + n^2 J_l) \ddot{\theta}_m + (B_m + n^2 B_l) \dot{\theta}_m$$

หรือ $T_m = J_{eff} \ddot{\theta}_m + B_{eff} \dot{\theta}_m \quad \dots 3.3$



รูปที่ 3.2 วงจรไฟฟ้าของมอเตอร์

จากรูปที่ 3.2 แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (back EMF, $V_b(t)$) ของมอเตอร์ที่เกิดจากการหมุนขดลวดอาร์เมเจอร์ตัดสนามแม่เหล็ก คำนวณค่าได้ดังสมการที่ 3.4

$$V_b(t) = K_b \dot{\theta}_m(t) \quad \dots 3.4$$

โดยที่ K_b คือค่าคงที่แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ จากกฎของเคอร์ซอฟความสัมพันธ์ของวงจรวจรอาร์เมเจอร์เป็นดังสมการที่ 3.5

$$V(t) - V_b(t) = L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) \quad \dots 3.5$$

ถ้าลาปลาซทรานสฟอร์มได้

$$V(s) - K_b s \theta_m(s) = L(s+R)I(s) \quad \dots 3.6$$

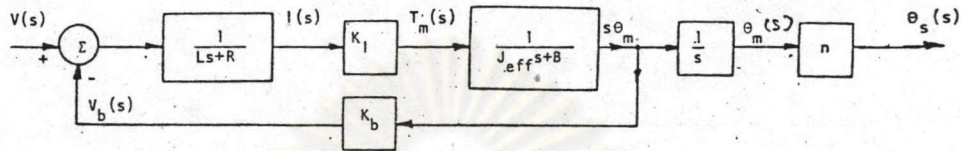
แรงบิดที่สร้างจากมอเตอร์จะแปรตามกระแสของอาร์เมเจอร์ดังสมการที่ 3.7

$$T_m(t) = K_t i(t)$$

หรือ $T_m(s) = K_t I(s) \quad \dots 3.7$

โดยที่ K_t คือค่าคงที่แรงบิด (torque constant) ทราบสเฟอ์ฟังก์ชันของมอเตอร์หาได้โดยนำสมการที่ 3.3 และ 3.6 แทนค่าลงสมการที่ 3.7 แล้วจัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ 3.8 ซึ่งนำไปเขียนบล็อกไดโแกรมได้ดังรูปที่ 3.3

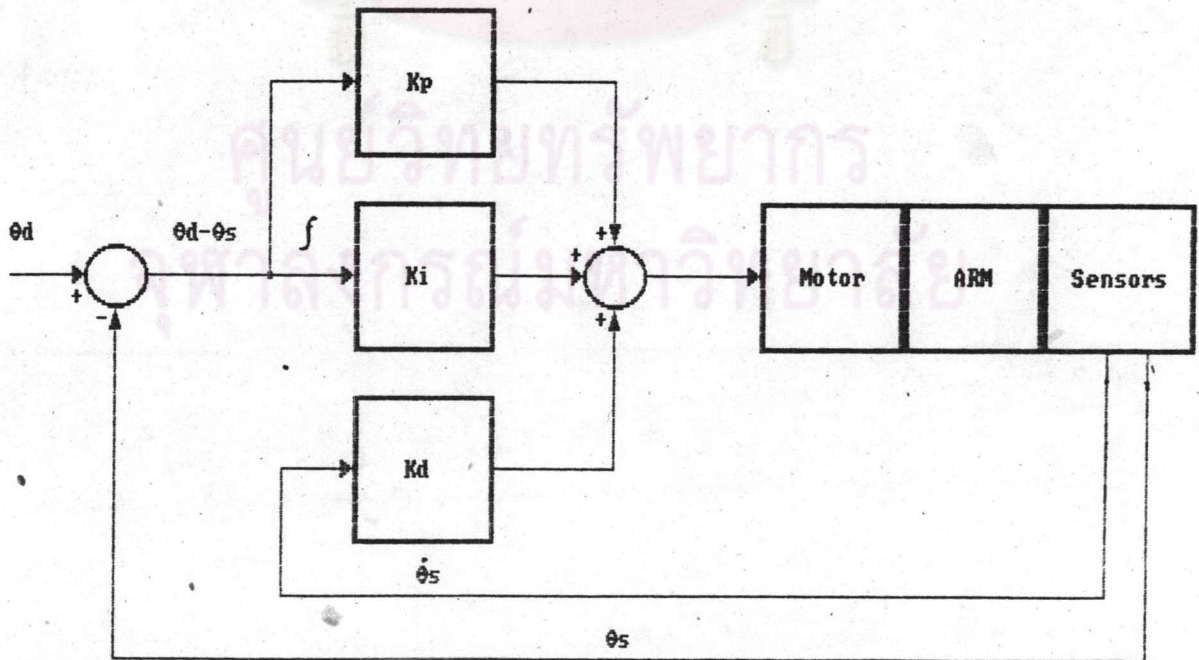
$$\theta_m(s)/V_m(s) = K_t/s[LJ_{eff}s^2+(RJ_{eff}+LB_{eff})s+(RB_{eff}+K_tK_b)] \dots 3.8$$



รูปที่ 3.3 มอเตอร์บล็อกไดโแกรม

การควบคุมแบบป้อนกลับ

การควบคุมแบบป้อนกลับ มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ระบบสามารถตอบสนองต่อคำสั่งควบคุมได้รวดเร็ว แม่นยำ และมีเสถียรภาพแม้ระบบจะถูกรบกวนจากภายนอก ดังนั้นการพิจารณาเลือกระบบควบคุมต้องพิจารณาถึงข้อสำคัญ 3 ประการคือ 1. การตอบสนองคำสั่งของช่วงทรานเสียนท์ (transient-response) 2. เสถียรภาพของระบบควบคุม (stability) และ 3. ความคลาดเคลื่อนคงตัว (steady-state error) โดยที่ความคลาดเคลื่อนคงตัวเกิดจากการคลาดเคลื่อนของช่วงทรานเสียนท์ , การเปลี่ยนแปลงคำสั่งควบคุม , ความคลาดเคลื่อนของอัตราขยาย , การรบกวนจากภายนอกระบบ (disturbance) และความคลาดเคลื่อนจากอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบ เช่น สแตติกฟริคชัน (static friction), แบคแลช (backlash)



รูปที่ 3.4 บล็อกไดโแกรมของการควบคุมแบบ พี ไอ ดี

สำหรับการควบคุมมอเตอร์ขับเคลื่อนแกนแบบแกนหมุนโดยใช้การควบคุมแบบพี ไอ ดี ดังรูปที่ 3.4 สามารถตอบสนองต่อคำสั่งควบคุมได้ตามวัตถุประสงค์ข้างต้นทั้ง 3 ประการ โดยที่ตัวควบคุมแบบ พี (proportional controller: K_p) เป็นตัวปรับปรุงความเร็วการตอบสนองในช่วงทรานเซียนท์ ถ้า K_p มีค่ามากระบบก็จะมี การตอบสนองเร็ว ตัวควบคุมแบบ ไอ (integral controller: K_i) เป็นตัวกำจัดความคลาดเคลื่อนคงตัวจากสาเหตุต่างๆที่กล่าวแล้วข้างต้น (ยกเว้นแบคแลช) และ ตัวควบคุมแบบ ดี (derivative controller : K_d) เป็นตัวปรับปรุงเสถียรภาพของระบบ ด้วยการเป็นแด้มปีง (damping) และลดโอเวอร์ชูท (over shoot) ของระบบที่เพิ่มตามค่า K_p

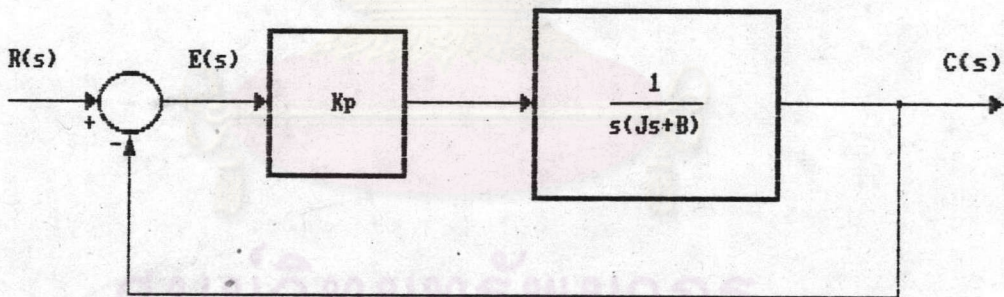
การควบคุมแบบ พี กับความคลาดเคลื่อนคงตัว

พิจารณาระบบควบคุมอันดับที่ 2 ดังรูปที่ 3.5 หาความสัมพันธ์ของความคลาดเคลื่อน $E(s)$ กับคำสั่งควบคุม $R(s)$ ได้ดังสมการที่ 3.8

$$E(s) = R(s)(Js^2 + Bs) / Js^2 + Bs + K_p \quad \dots 3.8$$

ถ้าคำสั่งควบคุมเป็นแบบเรมพ์ ($R(s) = 1/s^2$) ความคลาดเคลื่อนคงตัว (e_{∞}) หาได้จากสมการที่ 3.9

$$e_{\infty} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = B/K_p \quad \dots 3.9$$



รูปที่ 3.5 บล็อกไดอแกรมของการควบคุมแบบ พี

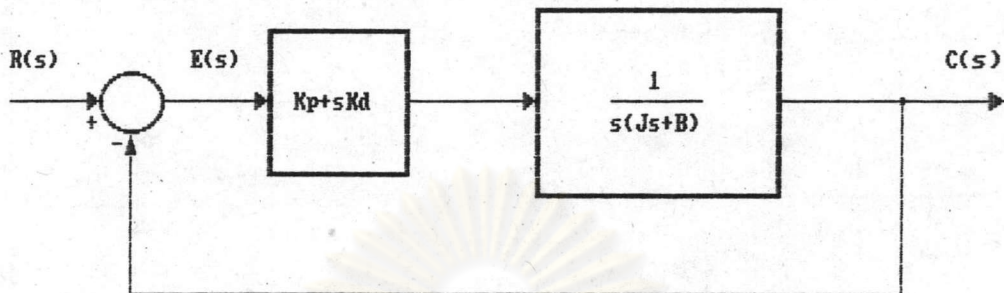
จากรูปที่ 3.5 ระบบมีแด้มปีงเรโซ $\zeta = B/2\sqrt{K_p J}$ และจากสมการที่ 3.9 การเพิ่มค่า K_p ทำให้ความคลาดเคลื่อนคงตัวและแด้มปีงเรโซลดลง แต่การลดลงของแด้มปีงเรโซทำให้การตอบสนองคำสั่งควบคุมแบบสเตปมีค่าโอเวอร์ชูทมากขึ้น ซึ่งอาจทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้

การควบคุมแบบ พี ดี กับความคลาดเคลื่อนคงตัว

พิจารณาระบบควบคุมอันดับที่ 2 จากรูปที่ 3.5 สามารถใช้การควบคุมแบบ พี ดี ได้ ดังรูปที่ 3.6 โดยที่ความสัมพันธ์ของความคลาดเคลื่อนหาได้ตามสมการที่ 3.10 และผลของความคลาดเคลื่อนคงตัวของคำสั่งควบคุมแบบเรมพ์หาได้ดังสมการที่ 3.11

$$E(s) = Js^2 + (B+K_d)s / Js^2 + (K_d+B)s + K_p \quad \dots 3.10$$

$$e_{ss} = B/K_p \quad \dots 3.11$$



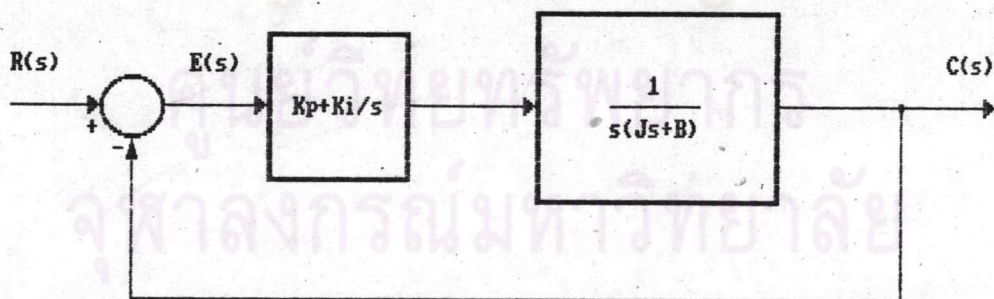
รูปที่ 3.6 บล็อกไดอแกรมของการควบคุมแบบ พี ดี

จากรูปที่ 3.6 ระบบมีแดมปีงเรโซ $\xi = (B+K_d)/2\sqrt{K_p}$ และจากสมการที่ 3.11 การเพิ่มค่า K_p จะให้ผลลักษณะเดียวกับการควบคุมแบบ พี แต่แดมปีงเรโซสามารถปรับเพิ่มค่าได้ตามค่า K_d ซึ่งเป็นการลดโอเวอร์ชูทของระบบ หรือกล่าวได้ว่า K_d เป็นตัวปรับรักษาเสถียรภาพ

การควบคุมแบบ พี ไอ กับความคลาดเคลื่อนคงตัว

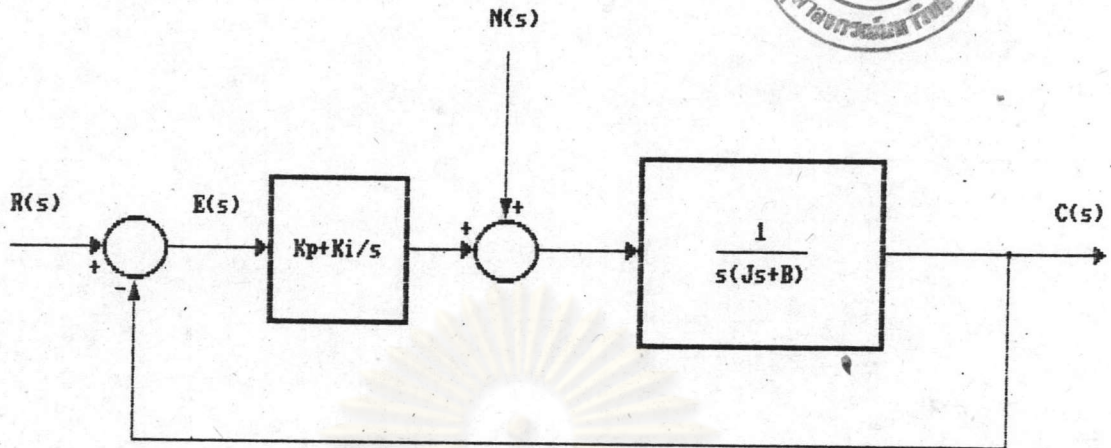
การควบคุมแบบ พี กับระบบอันดับที่ 2 ดังรูปที่ 3.5 สามารถใช้การควบคุมแบบ พี ไอ ได้ดังรูปที่ 3.7 โดยที่ความคลาดเคลื่อนของระบบหาได้จากสมการที่ 3.12

$$E(s) = R(s)(Js^2 + Bs^2) / Js^2 + Bs^2 + K_p s + K_i \quad \dots 3.12$$



รูปที่ 3.7 บล็อกไดอแกรมการควบคุมแบบ พี ไอ

แล้วนำมาหาความคลาดเคลื่อนคงตัวของคำสั่งควบคุมแบบแรมพ์ เช่นเดียวกับการควบคุมแบบ พี ข้างต้น พบว่าความคลาดเคลื่อนคงตัวมีค่าเป็นศูนย์แสดงว่าการควบคุมแบบ ไอ K_i สามารถกำจัดความคลาดเคลื่อนคงตัวให้ระบบได้ แต่โดยแท้จริงของการควบคุมพบว่าระบบมักจะถูกรบกวนจากแรงภายนอกด้วย จึงทำให้ความคลาดเคลื่อนของระบบยังคงมีอยู่ จากรูปที่ 3.7 นำมาพิจารณา ระบบควบคุมแบบมีการรบกวนจากภายนอกได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 บล็อกไดอแกรมการควบคุมแบบ พี ไอ กับระบบที่ถูกรบกวนจากแรงภายนอก

พิจารณาผลการรบกวนระบบจากแรงภายนอก $N(s)$ เมื่อไม่มีคำสั่งควบคุม $R(s)$ หรือ $R(s)$ มีค่าเป็นศูนย์ ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นหาได้จากสมการที่ 3.13

$$E(s) = N(s)(-s)/(Js^2 + Bs^2 + K_p s + K_i) \quad \dots 3.13$$

ถ้าการรบกวนระบบจากแรงภายนอกเป็นแบบแรมพ์ $N(s) = T_n/s^2$ ความคลาดเคลื่อนคงตัวของการควบคุมมีค่าดังสมการที่ 3.14 แต่ถ้าการรบกวนระบบจากแรงภายนอกเป็นแบบยูนิตสเตป $N(s) = T_n/s$ ความคลาดเคลื่อนคงตัวมีค่าเป็นศูนย์ แสดงว่า K_i สามารถกำจัดความคลาดเคลื่อนการรบกวนแบบยูนิตสเตปได้

$$e_{ss} = T_n/K_i \quad \dots 3.14$$

$$\begin{aligned} e_{ss} &= \lim_{s \rightarrow 0} (-s^2 \cdot T_n/s) / (Js^2 + Bs^2 + K_p s + K_i) \\ &= 0 \quad \dots 3.15 \end{aligned}$$

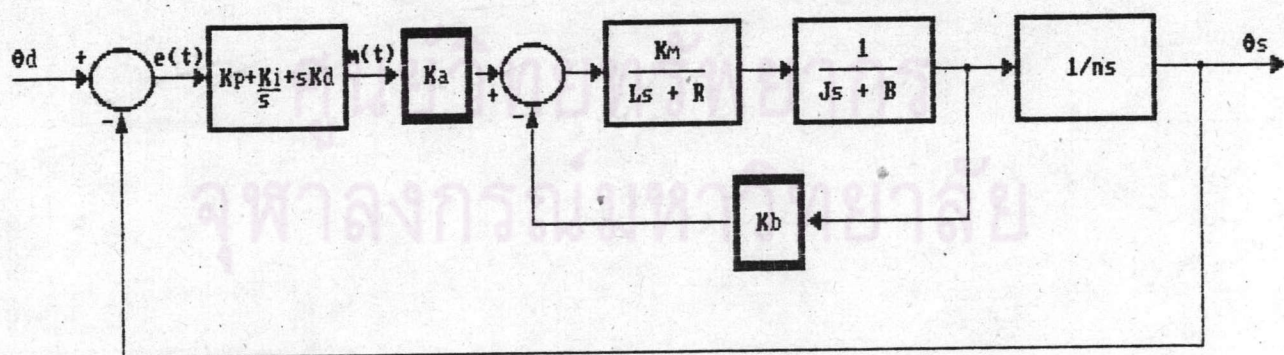
การควบคุมแบบ พี ไอ ดี กับแซนกล

การควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ที่มีชุดเฟืองทดของระบบแซนกลแบบ พี ไอ ดี มีบล็อกไดอแกรมดังรูปที่ 3.9 ขนาดของสัญญาณควบคุม $m(t)$ หาได้ตามสมการที่ 3.16

$$m(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \cdot \dot{e}(t) \quad \dots 3.16$$

โดยที่

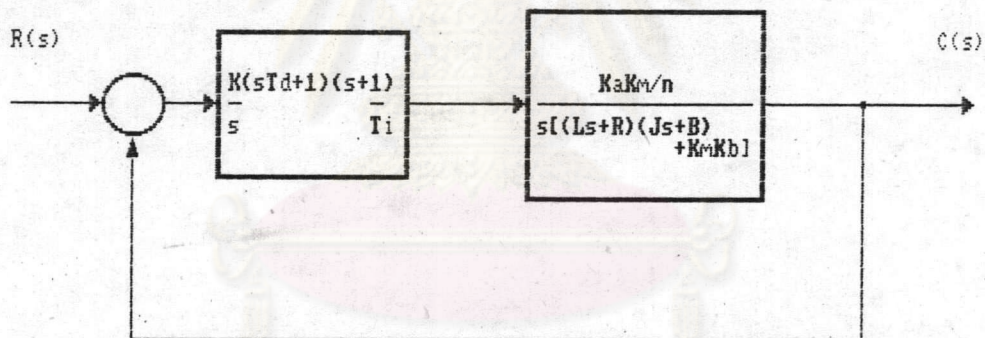
- $m(t)$ = สัญญาณควบคุมที่ได้จากตัวควบคุมพี ไอ ดี ที่เวลา t
 $e(t)$ = ค่าสัญญาณแตกต่างระหว่างจุดอ้างอิงกับค่าที่วัดได้ที่เวลา t
 K_p = ค่าคงที่ของตัวควบคุมแบบ พี
 K_i = ค่าคงที่ของตัวควบคุมแบบ ไอ
 K_d = ค่าคงที่ของตัวควบคุมแบบ ดี
 K_u = อัตราขยายของเพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์
 K_m = ค่าคงที่แรงบิดมอเตอร์
 K_b = ค่าคงที่แรงดันย้อนกลับ
 L = ค่าอินดักแตนซ์ของมอเตอร์
 R = ค่าความต้านทานของมอเตอร์
 J = โมเมนต์แรงเฉื่อยของมอเตอร์และโหลด
 B = สัมประสิทธิ์วิสคอสแดมป์ของมอเตอร์และโหลด
 N = อัตราทดของชุดเฟืองทด



รูปที่ 3.9 บล็อกไดอแกรมการควบคุมแบบพี ไอ ดี กับมอเตอร์แกนกล

การออกแบบหาค่า เกนของสัญญาณควบคุม

คุณลักษณะที่ต้องการของระบบควบคุมคือ 1. ต้องการให้ระบบมีความเที่ยงตรงที่สภาวะสงบนิ่ง (steady-state accuracy) เป็นที่น่าพอใจ 2. ให้ผลตอบสนองได้รวดเร็ว 3. มีการเรคูเลชันที่ต่ำกว่าคือสามารถต้านการรบกวนที่มีต่อระบบได้ดี และ 4. ระบบจะต้องมีเสถียรภาพให้ผลตอบสนองชั่วขณะที่เป็นการแดมพ์ลงได้ดี เพื่อให้ระบบมีคุณลักษณะตามจุดมุ่งหมาย เราจึงเลือกใช้การควบคุมแบบ พี ไอ ดี ในการออกแบบจุดมุ่งหมายหลักคือ ต้องการให้ระบบมีความคลาดเคลื่อนคงตัวน้อยที่สุด ซึ่งจากการควบคุมที่กล่าวข้างต้นความคลาดเคลื่อนคงตัวของระบบจะลดลงเมื่อเกน K_p มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นการออกแบบตัวควบคุมจะทำการเลือกค่า K_p ที่ทำให้ระบบมีความเที่ยงตรงเป็นที่น่าสนใจ แล้วจึงทำการเลือกค่า K_d และ K_i มาเพื่อให้ระบบมีคุณลักษณะที่ดีครบ 4 ประการข้างต้น การเลือก K_p และ K_i เป็นการชดเชยระบบเพื่อทำให้ระบบมีเสถียรภาพที่ดี และต้องไม่ทำให้ความเที่ยงตรงของระบบด้อยลงไป จากรูปที่ 3.9 นำมาจัดบล็อกไดโแกรมของระบบแล้วเขียนใหม่ โดยจัดให้ตัวควบคุม พี ไอ ดี อยู่ในลักษณะของทามคอนสแตนท์ได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 บล็อกไดโแกรมของระบบควบคุม พี ไอ ดี ของมอเตอร์

จากบล็อกของตัวควบคุมในรูปที่ 3.10 กำหนดให้

$$K_p = K(1 + T_d/T_i) \quad \dots 3.17$$

$$K_i = K/T_i \quad \dots 3.18$$

$$K_d = K \cdot T_d \quad \dots 3.19$$

ขั้นตอนในการออกแบบระบบควบคุม

1. พิจารณาการควบคุมเป็นแบบ โพรพอร์ชันนอล
2. เลือกค่าโพรพอร์ชันนอลเกน ทำให้ระบบมีความเที่ยงตรง หรือความคลาดเคลื่อนคงตัวเป็นที่น่าสนใจ และทำงานได้ภายใต้กำลังขยาย

3. พล็อตค่าการตอบสนองความถี่เปิดระบบมอเตอร์ เพื่อหาคอนเนอร์ฟรีควานซี
4. พิจารณาการชดเชยระบบควบคุมแบบ พี เป็นแบบ พี ไอ ดี ดังรูปที่ 3.10
5. เลือกค่า $1/T_d$ ให้มีค่าใกล้เคียงกับคอนเนอร์ฟรีควานซีของระบบมอเตอร์ในข้อ 3
6. เลือกค่า $1/T_1$ ให้มีค่าน้อยกว่า $1/T_d$ ประมาณ 20 เท่า
7. พล็อตค่าการตอบสนองความถี่เปิดของตัวควบคุมและของทั้งระบบ เพื่อพิจารณาเฟสมาร์จิน และเกนมาร์จิน โดยเฟสมาร์จินของทั้งระบบควรมีค่ามากกว่า 45 องศา
8. การปรับค่าเฟสมาร์จินรวมของทั้งระบบตามข้อ 7 ปรับจากค่า T_1 หรือ T_d ได้ แต่ควรปรับที่ T_1 เพื่อให้ $1/T_d$ ยังคงอยู่บริเวณคอนเนอร์ฟรีควานซีเช่นเดิม
9. ตรวจสอบเสถียรภาพของระบบจากโพลของสมการคาร์แรกเตอร์ริสติก
10. ทดสอบค่าตัวควบคุม พี ไอ ดี ที่ได้ตามสมการที่ 3.17-3.19 กับระบบจริง
11. การปรับปรุงเสถียรภาพของระบบให้ดีขึ้น ทำโดยปรับค่าเฟสมาร์จินของระบบตามข้อ 7 ให้มีค่าเพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 3.10 การออกแบบเลือกค่าตัวควบคุมของมอเตอร์แกนข้อคอกตามขั้นตอน 11 ข้อข้างต้นเมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆให้สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

K_m	=	4	โวลต์/โวลต์
K_m	=	0.0551	นิวตันเมตร/แอมป์
K_b	=	0.0554	โวลต์/(เรเดียน/วินาที)
n	=	100	
R	=	1.1	โอห์ม
L	=	23	มิลลิเฮนรี่
B	=	6.74×10^{-5}	กิโลกรัมเมตร ² /วินาที

โมเมนต์ของแรงเฉื่อยด้านเพลามอเตอร์หาได้จากสมการที่ 3.17

$$J = J_m + 1/n^2 J_{max}$$

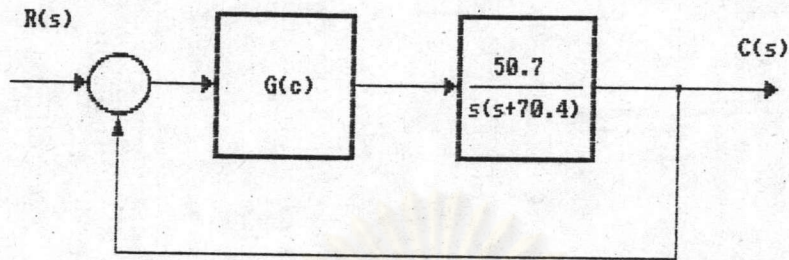
โดยที่

$$J_m = \text{โมเมนต์แรงเฉื่อยของมอเตอร์} = 3.88 \times 10^{-5} \text{ กิโลกรัมเมตร}^2$$

$$J_{max} = \text{โมเมนต์แรงเฉื่อยของแกนหมุน} = 0.074 \text{ กิโลกรัมเมตร}^2$$

$$\begin{aligned} J &= 3.88 \times 10^{-5} + 0.074/100^2 \\ &= 3.95 \times 10^{-5} \text{ กิโลกรัมเมตร}^2 \end{aligned}$$

แทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบ โดยให้ค่าอินดักแทนซ์ของมอเตอร์มีค่าเป็นศูนย์ จะได้บล็อกไดอแกรมดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 บล็อกไดอแกรมของระบบการควบคุมแบบ พี ไอ ดี ของมอเตอร์แกนฐาน

จากสมการที่ 3.10 และ 3.11 เมื่อ $G_c = K$

$$e_{ss} = \frac{70.42}{50.7K} = 1.39/K$$

กำหนดให้ระบบมี $e_{ss} = 0.005$ เรเดียน

ดังนั้น $K = 277.8$

การหาค่า K_p และ K_d จะพิจารณาจาก การตอบสนองความถี่ (frequency response) ของ ทรานสเฟอ์ฟังก์ชันขั้วเปิด (open loop transfer function) ของระบบ $G(s)$ และของระบบ ควบคุมพี ไอ ดี ดังแสดงในรูปที่ 3.12

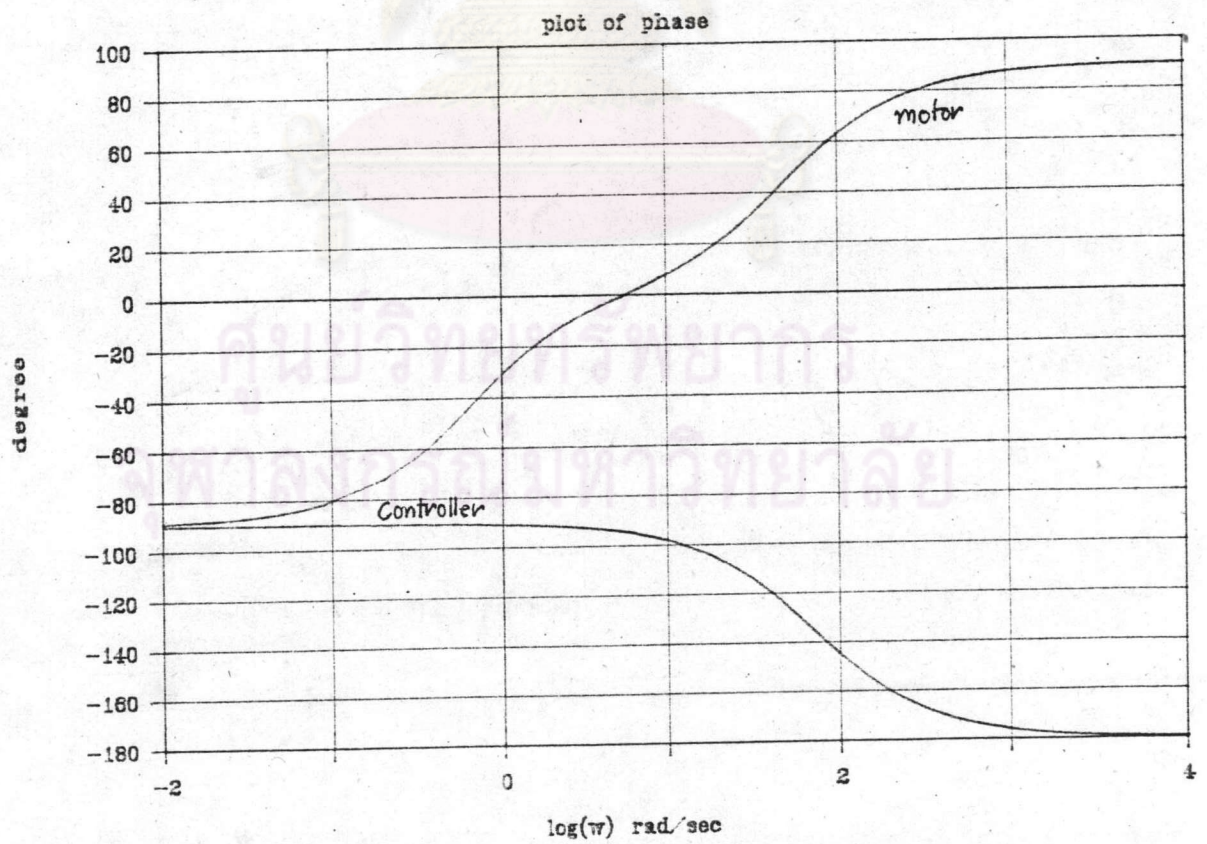
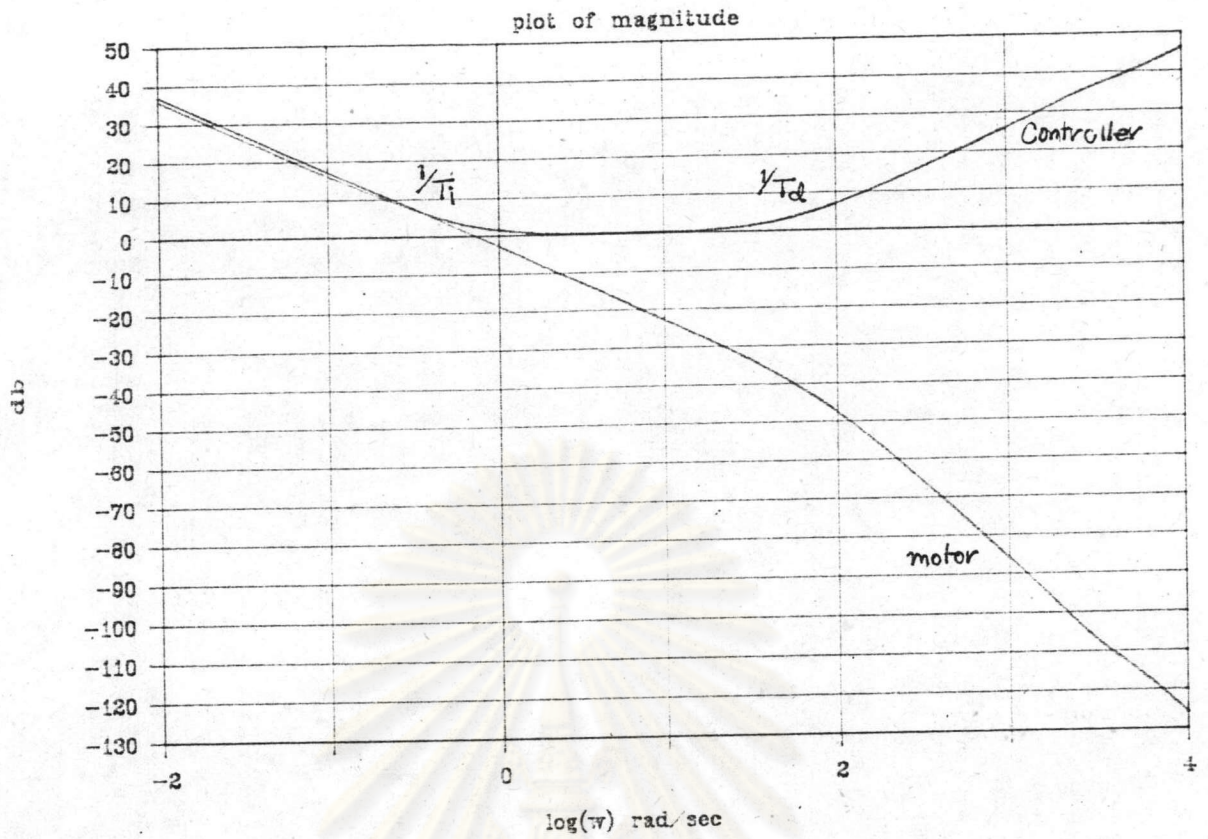
จากรูปที่ 3.12 พบว่าการตอบสนองความถี่ขั้วเปิด (open loop frequency response) ของระบบควบคุมแบบ พี ไอ ดี มีคอนเนอร์เฟรควนซีที่ $1/T_1$ และ $1/T_d$ และมีมุมเฟส (phase angle) อยู่ระหว่าง -90 ถึง 90 องศา จากที่กล่าวมาแล้วว่าการออกแบบจะเลือกให้ $1/T_d$ มีค่า ใกล้เคียงกับคอนเนอร์เฟรควนซีของระบบและระบบควรมีเฟสมาร์จินไม่น้อยกว่า 45 องศา ดังนั้น จากรูป 3.13 เลือกค่า $1/T_d$ ให้เท่ากับ 50 เรเดียน/วินาที และ $1/T_1$ เท่ากับ 0.625 ซึ่งให้ค่า ของเฟสมาร์จินของทั้งระบบมีค่า 90 องศา เกนมาร์จินเป็น $-x$ ซึ่งแสดงว่าระบบเกิดการสั่น แต่ ทรานสเฟอ์ฟังก์ชันของระบบให้ค่าโพล (pole) ที่ -85.151 , -21.1 และ -0.3387 ซึ่งแสดงว่า ระบบมีเสถียรภาพ

จากสมการที่ 3.17-3.19 แทนค่า T_d และ T_1 ได้ค่าเกน K_p , K_i , K_d ดังนี้

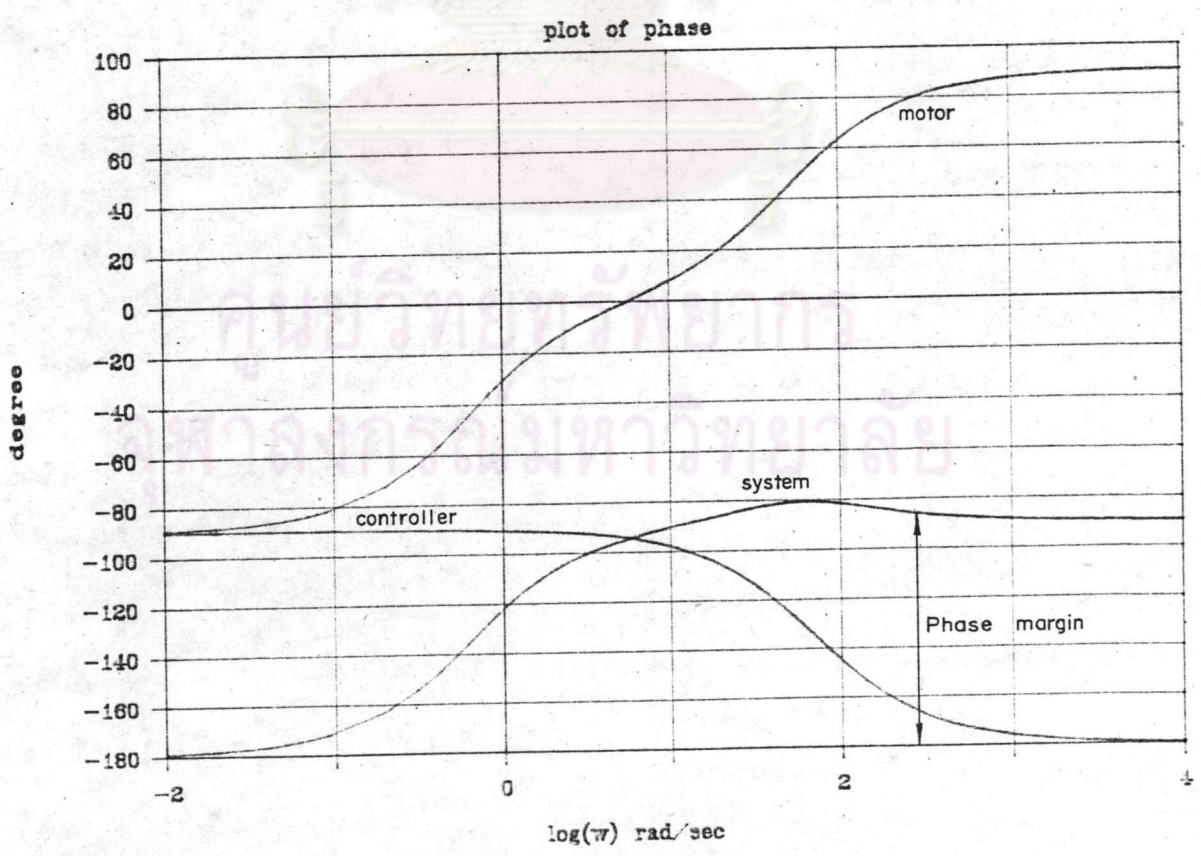
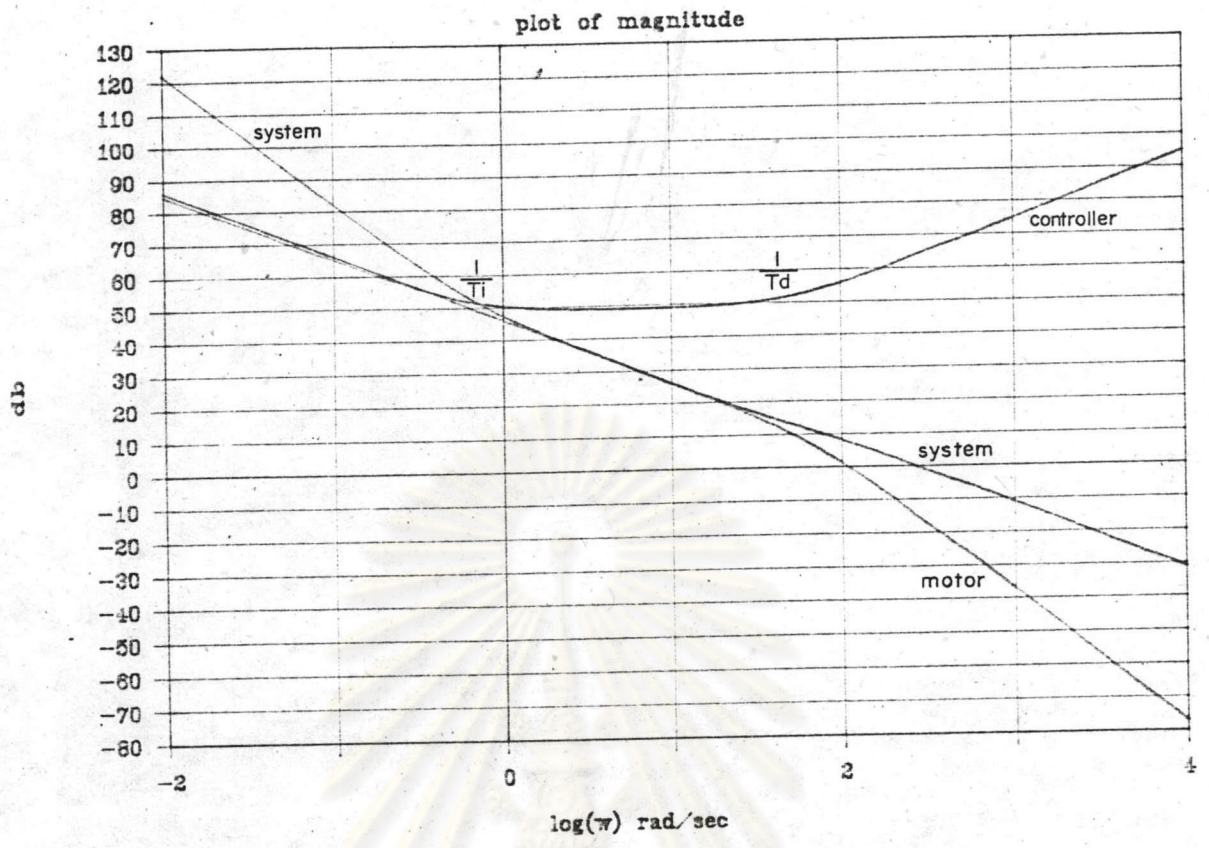
$$K_p = 280.5$$

$$K_i = 173.1$$

$$K_d = 5.5$$



รูปที่ 3.12 โปตพลอตของแกนข้อคอกของแขนกล



รูปที่ 3.13 โพลพลอตของระบบควบคุมแกนข้อคอกของแซนเกล

จากรูปที่ 3.10 กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของมอเตอร์แกนหัวไหล่ได้ดังนี้

K_u	=	12	โวลต์/โวลต์
K_m	=	0.191	นิวตันเมตร/แอมป์
K_b	=	0.191	โวลต์/(เรเดียน/วินาที)
n	=	90	
R	=	1.8	โอห์ม
B	=	4.58×10^{-5}	กิโลกรัมเมตร ² /วินาที
J	=	3.49×10^{-4}	กิโลกรัมเมตร ² /วินาที
$G(s)$	=	$40.54/s(s+58.23)$	
K	=	576	

เลือก T_d, T_1 ให้มีค่าเท่ากับ 0.02 และ 2 ซึ่งจะทำให้ระบบมีเฟสมาร์จิน 70 องศา และได้ค่าเกณฑ์ดังนี้

K_p	=	581.8
K_i	=	288
K_d	=	11.5

และในทำนองเดียวกันได้ค่าเกณฑ์ของแกนฐานเป็น

K_p	=	323.6
K_i	=	174
K_d	=	6.2

จากรายละเอียดการออกแบบข้างต้นสามารถสรุปผลการเลือกค่าตัวควบคุมของแกนกลทั้ง 3 แกนได้ดังตารางรูปที่ 3.14

	แกนฐาน	แกนหัวไหล่	แกนข้อศอก
I design(Kg.m ²)	1.80	2.40	0.15
J design(motor side)	3.94×10^{-4}	3.57×10^{-4}	3.95×10^{-5}
e_{ss} (design)rad	0.005	0.005	0.005
Phase margin	90	70	90
System pole	-101.71, -42.4	-75.41, -51.42	-85.15, -21.1
	-0.075	-0.441	-0.338
K_p	323.6	581.8	280.5
K_i	174	288	173.1
K_d	6.2	11.5	5.5

รูปที่ 3.14 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมของแกนกลสามแกน