

บทที่ 3

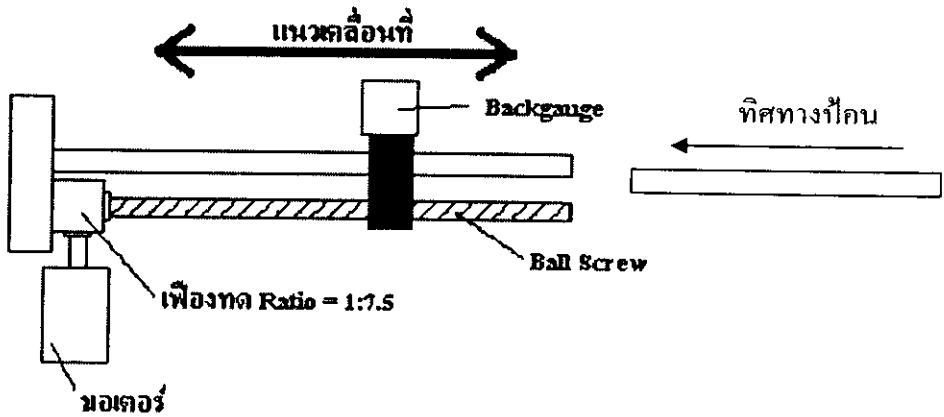
โครงสร้างและการจำลองการทำงานของระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ ในเครื่องพับและตัดเหล็ก

โครงสร้างของกระบวนการที่จะควบคุม มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการควบคุมระบบใดๆ เนื่องจากการรู้โครงสร้างดังกล่าว จะทำให้สามารถทำความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของระบบควบคุม และจากทฤษฎีพีชชีลอจิกที่ผ่านมาจะพบว่า ตัวควบคุมพีชชีลอจิกที่ใช้ควบคุมกระบวนการต่างๆ นั้น จะต้องกำหนดตัวแปรที่นำมาใช้เป็นตัวแปรอินพุตและเอาต์พุต ดังนั้นการนำตัวควบคุมพีชชีลอจิกไปใช้ควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำในเครื่องพับและตัดเหล็ก จึงมีความจำเป็นต้องทราบถึงโครงสร้างของมอเตอร์ในเครื่องพับและตัดเหล็ก เพื่อกำหนดและพิจารณาหาความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุต เพื่อใช้เป็นตัวแปรในการออกแบบ กฎการควบคุมต่อไป

3.1 โครงสร้างและการทำงานของเครื่องพับและตัดเหล็ก

ภายในเครื่องพับและตัดเหล็ก จะประกอบด้วยชุดวัฏระยะ (auto backgauge) ซึ่งทำหน้าที่ในการตั้งระยะในการตัด (พับ) แผ่นเหล็ก โดยจะเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับใบมีดและแนวตัด (แนวพับ) ตามระยะที่กำหนดโดยผู้ใช้ เมื่อต้องการตัด (พับ) แผ่นเหล็ก ก็จะไม่ต้องเสียเวลาในการวัฏระยะและเล็งแนวตัด (แนวพับ) เพียงดันแผ่นเหล็กเข้าทางด้านหน้าของเครื่องตัด (เครื่องพับ) ให้แผ่นเหล็กชนกับตัววัฏระยะในชุดวัฏระยะ แล้วทำการตัด หรือพับชิ้นงานก็จะได้ระยะเท่ากับที่กำหนดไว้

การทำงานของชุดวัฏระยะ นั้น จะเป็นการเคลื่อนที่ในแนวแกนเดียวคือตั้งฉากกับแนวตัด (แนวพับ) และตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของใบมีด โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำ (induction AC motor) ขับชุดเฟืองทดเพื่อหมุนบอลสกรู (ball screw) ที่มีชุดวัฏระยะ จับอยู่บนร่องเกลียว เมื่อบอลสกรูหมุน ก็จะทำให้ตัววัฏระยะ เลื่อนในแนวเส้น และในการกำหนดทิศทางการเลื่อนนั้น จะใช้การควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ ซึ่งติดอยู่กับบอลสกรูนั่นเอง ดังภาพประกอบ 3-1

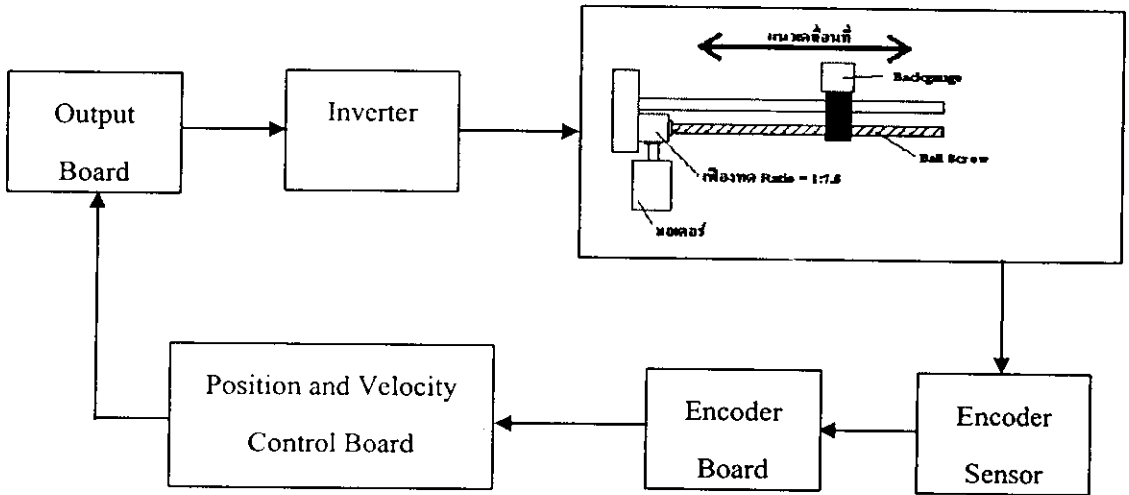


ภาพประกอบ 3-1 ลักษณะของตัววัดระยะ

ในการขับมอเตอร์นั้นจะใช้อินเวอร์เตอร์ (inverter) เพื่อควบคุมความเร็ว, ความเร่ง และทิศทางการหมุนของมอเตอร์ และใช้อินคริเมนทอลโรตารีเอนโคดเดอร์ (incremental rotary encoder) ในการตรวจสอบถึงตำแหน่งและทิศทางการหมุนของบอลสกรู นอกจากนี้ ยังมีลิมิตสวิตช์ (limit switch) ที่ปลายทั้งสองด้านของชุดวัดระยะ เพื่อตรวจสอบถึงการเคลื่อนที่มาจนถึงตำแหน่งสุดปลายของบอลสกรู เพื่อป้องกันความเสียหาย

กลไกของชุดวัดระยะนั้นไม่มีความซับซ้อนมากนัก โดยจะใช้มอเตอร์ส่งกำลังเข้าสู่ชุดเฟืองทดที่มีอัตราทดเท่ากับ 1:7.5 เพื่อลดความเร็วและเพิ่มทอร์กในการหมุนของบอลสกรู และบอลสกรูจะมีระยะพิทช์ (pitch) เท่ากับ 10 มิลลิเมตร ดังนั้นเมื่อบอลสกรู หมุนครบ 1 รอบจะทำให้ตัววัดระยะเคลื่อนที่ไป 10 มิลลิเมตร และในขณะเดียวกัน วงจรก็อ่านค่าจากโรตารีเอนโคดเดอร์ ได้ 400 สเตป (step) เช่นกัน เราจึงสามารถคำนวณได้ว่า ทุกๆ 1 สเตป ที่อ่านได้จากโรตารีเอนโคดเดอร์ จะเท่ากับการเคลื่อนที่ของตัววัดระยะ ทุกๆ $10 \text{ มม.} / 400 = 25 \text{ ไมครอน}$ นั่นเอง ดังนั้นระยะอ้างอิง (reference unit) ของชุดวัดระยะ นี้คือ 25 ไมครอน

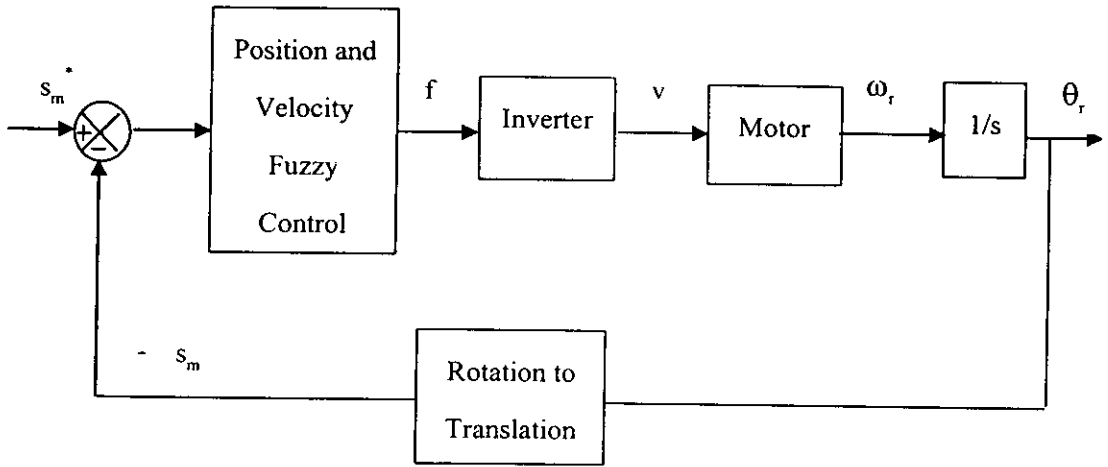
3.2 ส่วนประกอบของระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ในเครื่องพับและตัดเหล็ก



ภาพประกอบ 3-2 ส่วนประกอบของระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ที่ใช้ในเครื่องพับและตัดเหล็ก

ส่วนประกอบของระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ที่ใช้ในเครื่องพับและตัดเหล็ก ประกอบด้วย มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำ (induction AC Motor) (ซึ่งต่อไปจะเรียกว่า มอเตอร์), ลิมิทสวิตช์ (limit switch), บอลสกรู (ball screw) ซึ่งรวมเรียกว่า ชุดวัฏระยะ, อินคริเมนทอลโรตารีเอนโคดเดอร์ (incremental rotary encoder), และอินเวอร์เตอร์ (inverter) โดยมีบอร์ดควบคุมตำแหน่ง ซึ่งควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ 8 บิต ตระกูล MCS51 เบอร์ 89C51RD2 ทำหน้าที่ควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์โดยใช้การควบคุมแบบพีซีซีลอจิก ซึ่งจะรับค่าตำแหน่งปัจจุบันของมอเตอร์จากบอร์ดเอนโคดเดอร์ ใช้เป็นสัญญาณป้อนกลับในระบบควบคุม และทำการส่งสัญญาณเอาต์พุตที่คำนวณได้ไปยังบอร์ดเอาต์พุตเพื่อส่งให้อินเวอร์เตอร์สั่งให้มอเตอร์ทำงานต่อไป

3.3 แบบจำลองของระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ในเครื่องปั๊มและตัดเหล็ก

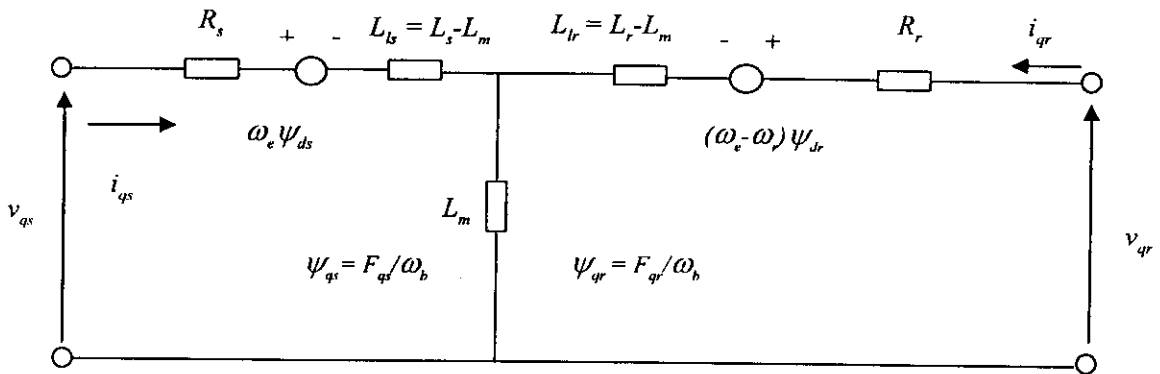


ภาพประกอบ 3-3 ระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์

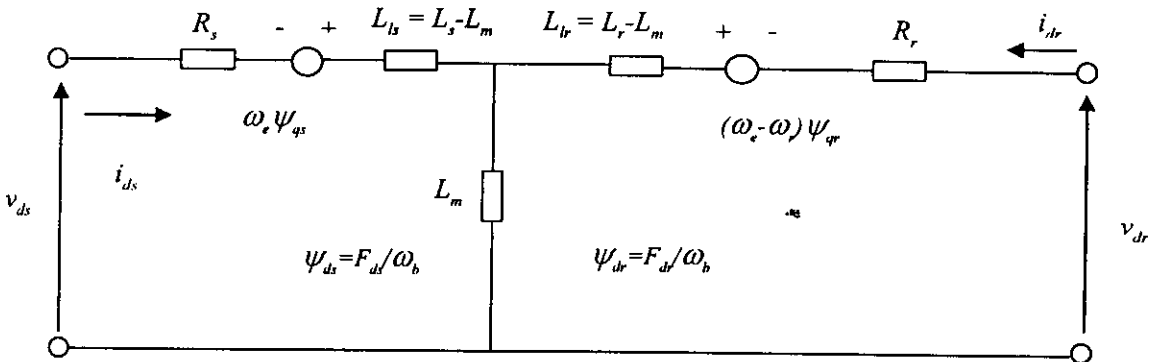
ระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ดังแสดงในภาพประกอบ 3-3 ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ ได้แก่ ส่วนกระบวนการ (plant) และส่วนตัวควบคุม (controller) ส่วนกระบวนการของระบบ จะประกอบด้วยมอเตอร์ และอินเวอร์เตอร์ และส่วนตัวควบคุม จะเป็นตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกที่ทำหน้าที่ควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ โดยจะทำการอินทิเกรตความเร็วของมอเตอร์ (ω_r) เพื่อให้ได้ตำแหน่งเชิงมุมจริงของมอเตอร์ (θ_r) จากนั้นจะถูกเปลี่ยนเป็นตำแหน่งเชิงเส้นจริงที่มอเตอร์เคลื่อนที่ไป (s_m) เพื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งเชิงเส้นเป้าหมาย (s_m^*) และนำผลลัพธ์ที่ได้ป้อนเป็นอินพุตให้กับตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก ตัวแปรอินพุตของตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก ประกอบด้วยค่าผิดพลาดของตำแหน่ง (position error) (E) ระหว่างตำแหน่งเป้าหมาย (target position) กับตำแหน่งการเคลื่อนที่จริงของมอเตอร์ และค่าการเปลี่ยนแปลงค่าผิดพลาดของตำแหน่ง (change of error) (CE) เอาท์พุตที่ได้จากตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกเป็นความถี่ที่กำหนดให้ตัวอินเวอร์เตอร์ เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายตามต้องการ

ภายในระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ จะประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ ได้แก่ ส่วนกระบวนการ (plant) และส่วนตัวควบคุม (controller) ซึ่งในส่วนตัวควบคุม จะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป ขณะที่ส่วนกระบวนการของระบบดังกล่าว จะประกอบด้วยมอเตอร์ และอินเวอร์เตอร์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.3.1 แบบจำลองมอเตอร์



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 3-4 วงจรสมมูลพลศาสตร์บนแกนที่หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส

(ก) บนแกน q° (ข) บนแกน d°

จากแบบจำลองดังกล่าว สามารถเขียนสมการในรูปของ ฟลักซ์ (flux linkage) ได้ดังนี้

$$\frac{dF_{qs}}{dt} = \omega_b \left[v_{qs} - \frac{\omega_e}{\omega_b} F_{ds} + \frac{R_s}{X_{ls}} (F_{mq} + F_{qs}) \right] \quad (3.1)$$

$$\frac{dF_{ds}}{dt} = \omega_b \left[v_{ds} + \frac{\omega_e}{\omega_b} F_{qs} + \frac{R_s}{X_{ls}} (F_{md} + F_{ds}) \right] \quad (3.2)$$

$$\frac{dF_{qr}}{dt} = \omega_b \left[v_{qr} - \frac{(\omega_e - \omega_r)}{\omega_b} F_{dr} + \frac{R_r}{X_{lr}} (F_{mq} - F_{qr}) \right] \quad (3.3)$$

$$\frac{dF_{dr}}{dt} = \omega_b \left[v_{dr} + \frac{(\omega_e - \omega_r)}{\omega_b} F_{qr} + \frac{R_r}{X_{lr}} (F_{md} - F_{dr}) \right] \quad (3.4)$$

$$F_{mq} = X_m^* \left[\frac{F_{qs}}{X_{ls}} + \frac{F_{qr}}{X_{lr}} \right] \quad (3.5)$$

$$F_{md} = X_m^* \left[\frac{F_{ds}}{X_{ls}} + \frac{F_{dr}}{X_{lr}} \right] \quad (3.6)$$

$$i_{qs} = \frac{1}{X_{ls}} (F_{qs} - F_{mq}) \quad (3.7)$$

$$i_{ds} = \frac{1}{X_{ls}} (F_{ds} - F_{md}) \quad (3.8)$$

$$i_{qr} = \frac{1}{X_{lr}} (F_{qr} - F_{mq}) \quad (3.9)$$

$$i_{dr} = \frac{1}{X_{lr}} (F_{dr} - F_{md}) \quad (3.10)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{n_p}{2} \right) \frac{1}{\omega_b} (F_{ds} i_{qs} - F_{qs} i_{ds}) \quad (3.11)$$

$$T_e - T_L = J \left(\frac{2}{n_p} \right) \frac{d\omega_r}{dt} \quad (3.12)$$

เมื่อ d : แกน d (direct axis)

q : แกน q (quadrature axis)

s : ตัวแปรสเตเตอร์ (stator variable)

r : ตัวแปรโรเตอร์ (rotor variable)

F_{ij} is the flux linkage ($i=q$ or $j=s$ or r)

v_{qs} , v_{ds} : แรงดันสเตเตอร์แกน q และ d (q and d-axis stator voltages)

v_{qr} , v_{dr} : แรงดันโรเตอร์แกน q และ d (q and d-axis rotor voltages)

F_{mq} , F_{md} : ฟลักซ์แมกนีไทซิงแกน q และ d (q and d axis magnetizing flux linkages)

R_r : ความต้านทานของขดลวดโรเตอร์ (rotor resistance)

R_s : ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ (stator resistance)

X_{ls} : stator leakage reactance ($\omega_b L_{ls}$)

X_{lr} : rotor leakage reactance ($\omega_b L_{lr}$)

X_m : magnetizing leakage reactance ($\omega_b L_m$)

$$X_m^* : \frac{1}{\left(\frac{1}{X_m} + \frac{1}{X_{ls}} + \frac{1}{X_{lr}} \right)}$$

i_{qs} i_{ds} : กระแสสเตเตอร์ในแกน q และ d (q and d-axis stator currents)

i_{qr} i_{dr} : กระแสโรเตอร์ในแกน q และ d (q and d-axis rotor currents)

n_p : จำนวนขั้วของขั้ว (number of poles)

J : โมเมนต์ความเฉื่อย (moment of inertia)

T_e : แรงบิดทางไฟฟ้า (electrical output torque)

T_L : แรงบิดของโหลด (load torque)

ω_e : ความถี่เชิงมุมสเตเตอร์ (stator angular electrical frequency)

ω_b : ความถี่ฐานเชิงมุมมอเตอร์ (motor angular electrical base frequency)

ω_r : ความเร็วเชิงมุมโรเตอร์ (rotor angular electrical speed)

สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกที่ใช้ในงานวิจัยนี้ กำหนดให้ v_{qr} v_{dr} ใน (3.3) และ (3.4) เป็นศูนย์

แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำ สามารถแสดงได้ดังสมการดิฟเฟอเรนเชียล (differential equation) ข้างต้น ในการแก้สมการเหล่านี้ จำเป็นต้องแปลงให้อยู่ในรูปสเตตสเปซ (State-space form)

$$\dot{x} = Ax + b$$

เมื่อ $x = [F_{qs} \ F_{ds} \ F_{qr} \ F_{dr} \ \omega_r]^T$: state vector

$F_{ij} = \Psi_{ij} \omega_b$ โดยที่ F_{ij} เป็น flux linkage ($i = q$ หรือ d และ $j = s$ หรือ r) และ Ψ_{ij} คือ ฟลักซ์

ในการแปลงให้อยู่ในรูปสเตตสเปซ ทำได้โดยการแทน (3.5) และ (3.6) ใน (3.1-3.4) แล้วรวมพจน์ที่เหมือนกันเข้าด้วยกัน จะได้สมการแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำในรูปสเตตสเปซ ดังนี้

$$\frac{dF_{qs}}{dt} = \omega_b \left[v_{qs} - \frac{\omega_e}{\omega_b} F_{ds} + \frac{R_s}{X_{ls}} \left(\frac{x_{ml}^*}{x_{lr}} F_{qr} + \left(\frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} - 1 \right) F_{qs} \right) \right] \quad (3.13)$$

$$\frac{dF_{ds}}{dt} = \omega_b \left[v_{ds} - \frac{\omega_e}{\omega_b} F_{qs} + \frac{R_s}{X_{ls}} \left(\frac{x_{ml}^*}{x_{lr}} F_{dr} + \left(\frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} - 1 \right) F_{ds} \right) \right] \quad (3.14)$$

$$\frac{dF_{qr}}{dt} = \omega_b \left[-\frac{(\omega_e - \omega_r)}{\omega_b} F_{dr} + \frac{R_r}{X_{lr}} \left(\frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} F_{qs} + \left(\frac{x_{ml}^*}{x_{lr}} - 1 \right) F_{qr} \right) \right] \quad (3.15)$$

$$\frac{dF_{dr}}{dt} = \omega_b \left[\frac{(\omega_e - \omega_r)}{\omega_b} F_{qr} + \frac{R_r}{X_{lr}} \left(\frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} F_{ds} + \left(\frac{x_{ml}^*}{x_{lr}} - 1 \right) F_{dr} \right) \right] \quad (3.16)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \left(\frac{n_p}{2J} \right) (T_e - T_L) \quad (3.17)$$

3.3.2 แบบจำลองอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ที่นำมาใช้ในการจำลองการทำงานของระบบ เป็นอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส มีลักษณะการทำงานแบบมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบไซน์มูชอยด์ (sinusoidal pulse width modulation) ใช้วิธีควบคุมแบบแรงดันต่อความถี่คงที่ (V/f control) สมการแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันเฟส (phase voltage) และแรงดันสาย (line voltage) เอาท์พุทเป็นดังนี้

$$\begin{aligned}v_{an} &= \frac{2}{3}v_{ao} - \frac{1}{3}v_{bo} - \frac{1}{3}v_{co} \\v_{bn} &= \frac{2}{3}v_{bo} - \frac{1}{3}v_{ao} - \frac{1}{3}v_{co} \\v_{cn} &= \frac{2}{3}v_{co} - \frac{1}{3}v_{ao} - \frac{1}{3}v_{bo}\end{aligned}\tag{3.18}$$

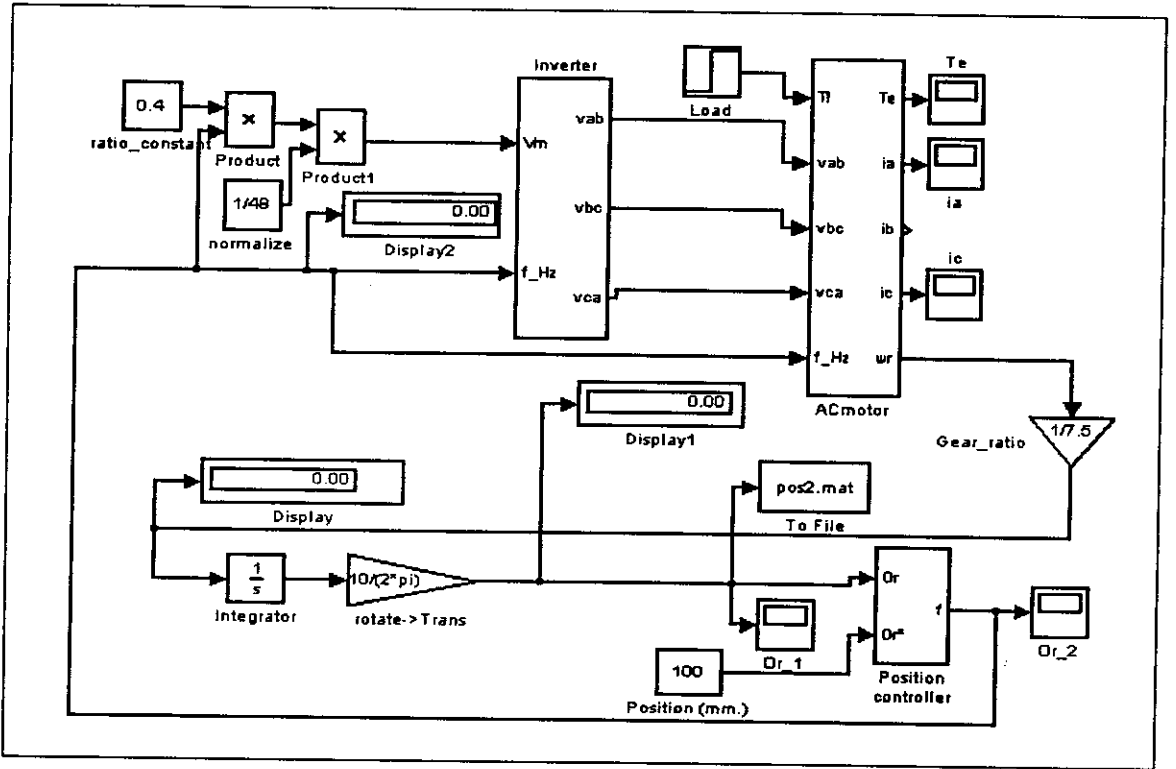
$$\begin{aligned}v_{ab} &= v_{ao} - v_{bo} \\v_{bc} &= v_{bo} - v_{co} \\v_{ca} &= v_{co} - v_{ao}\end{aligned}\tag{3.19}$$

จากสมการข้างต้น ได้ถูกนำมาสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอินเวอร์เตอร์ โดยใช้แรงดันสายเป็นสัญญาณเข้าของมอเตอร์ เนื่องจากมอเตอร์ที่ใช้งานจริงนั้นต่อแบบเดลตา และได้ นำแบบจำลองไปใช้ในการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB ต่อไป

3.4 การจำลองการควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์

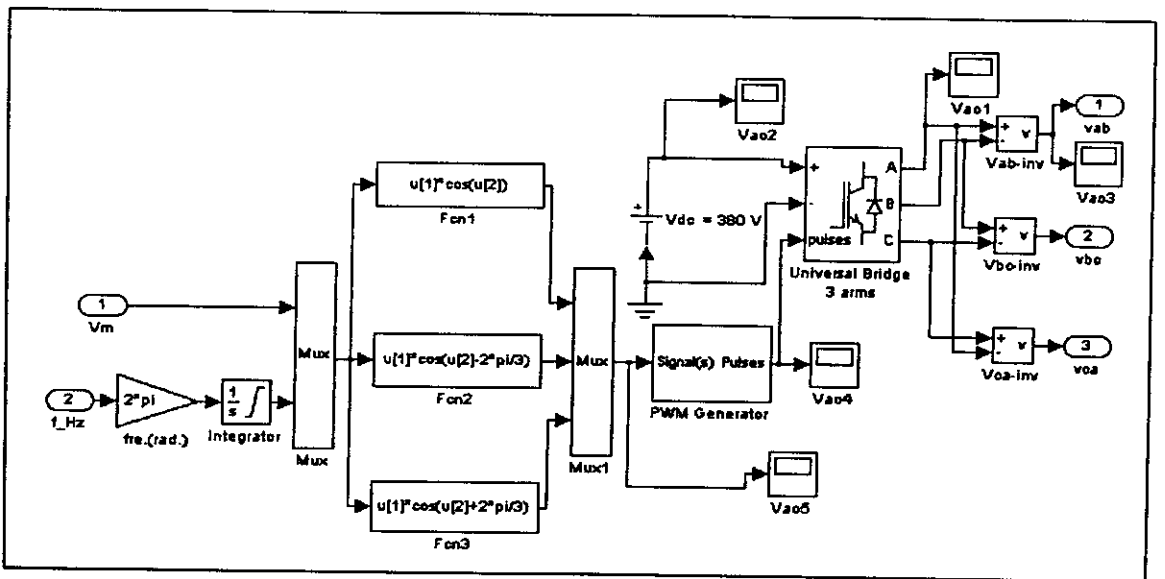
การจำลองการควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ได้นำโปรแกรม MATLAB/Simulink มาใช้ โดยใช้ ทูลบ็อกซ์ต่าง ๆ ในโปรแกรม อาทิ ทูลบ็อกซ์ระบบควบคุม (control system toolbox) และทำการ ออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกผ่านทางทูลบ็อกซ์ฟัซซี่ลอจิก (fuzzy logic toolbox)

ระบบที่นำมาทำการจำลองการทำงานบนคอมพิวเตอร์นั้น ได้สร้างขึ้นมาจากแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ของแต่ละส่วน ซึ่งประกอบด้วย อินเวอร์เตอร์, มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำ และตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก ดังภาพประกอบ 3-5



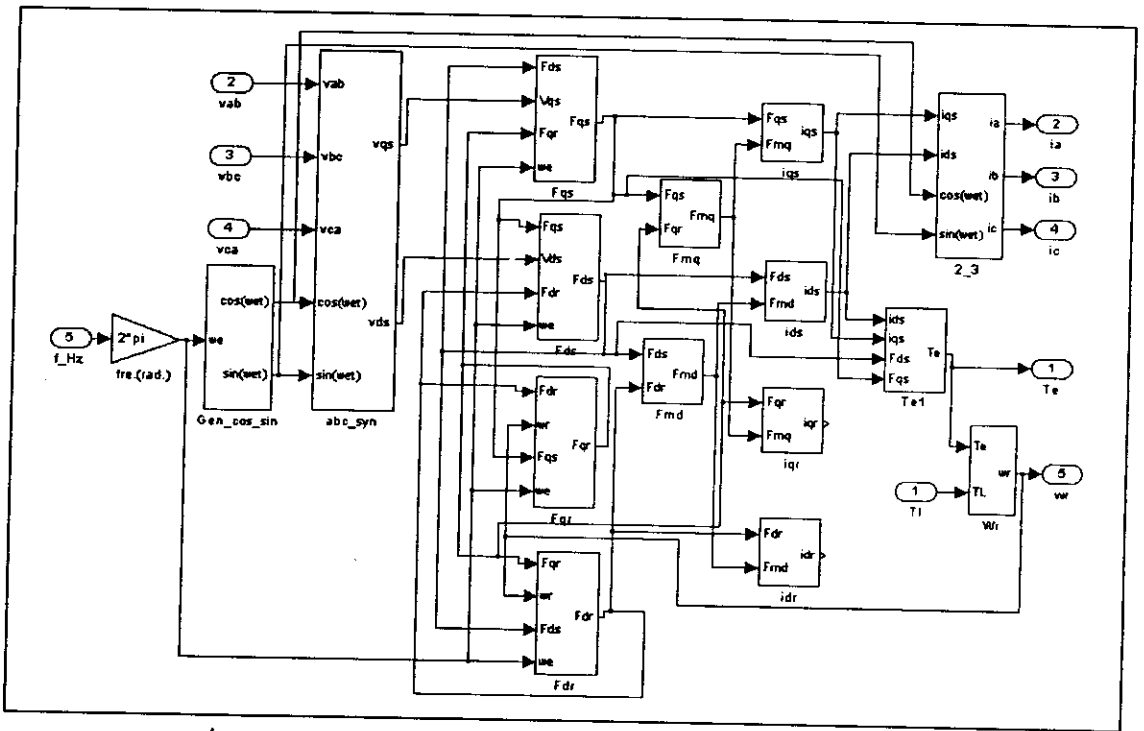
ภาพประกอบ 3-5 ระบบจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

จากภาพประกอบ 3-5 แสดงภาพรวมของระบบทั้งหมดโดยในระบบรวมนี้ จะประกอบด้วยระบบย่อยๆ 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนอินเวอร์เตอร์



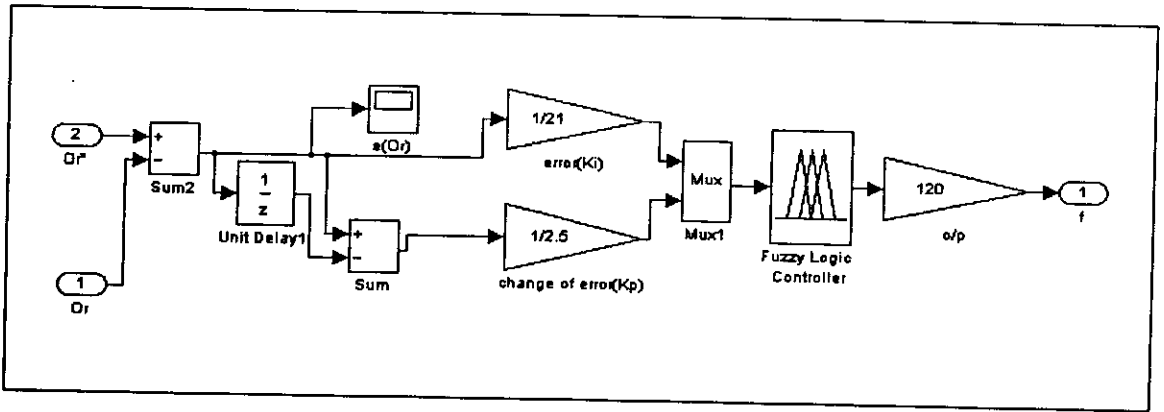
ภาพประกอบ 3-6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของส่วนอินเวอร์เตอร์

ส่วนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำ



ภาพประกอบ 3-7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของส่วนมอเตอร์เหนี่ยวนำ

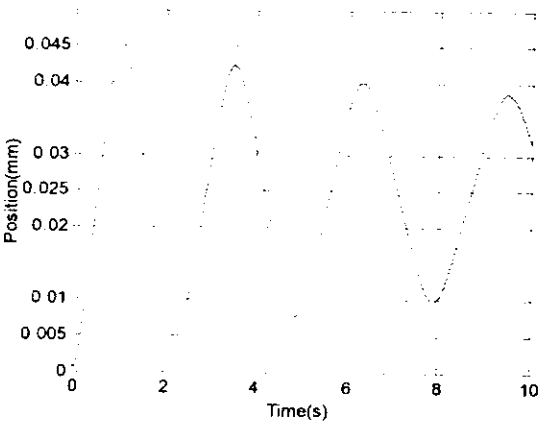
ส่วนตัวควบคุมพีชชีลลจิก



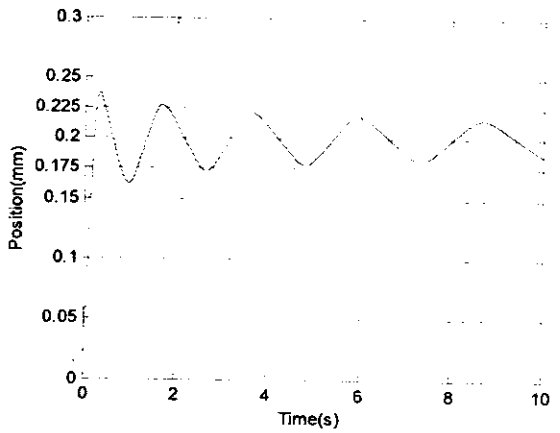
ภาพประกอบ 3-8 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของส่วนตัวควบคุมพีชชีลลจิก

ในการจำลองการทำงานนั้น จะป้อนตำแหน่งซึ่งเป็นระยะทางที่ต้องการให้มอเตอร์เคลื่อนที่ไปยังระบบจำลอง จากนั้นทำการพล็อตกราฟแสดงผลตอบสนองต่อตำแหน่ง เพื่อศึกษาและทำให้ทราบถึงพฤติกรรมในการเคลื่อนที่ ซึ่งได้ผลตอบสนองต่อตำแหน่ง ดังนี้

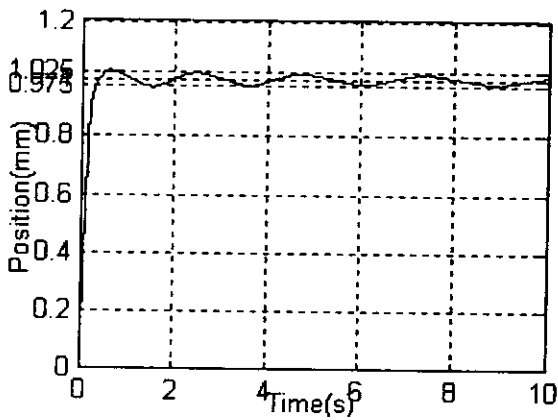
3.4.1 ผลตอบสนองต่อตำแหน่งที่ระยะทางต่างๆ กัน



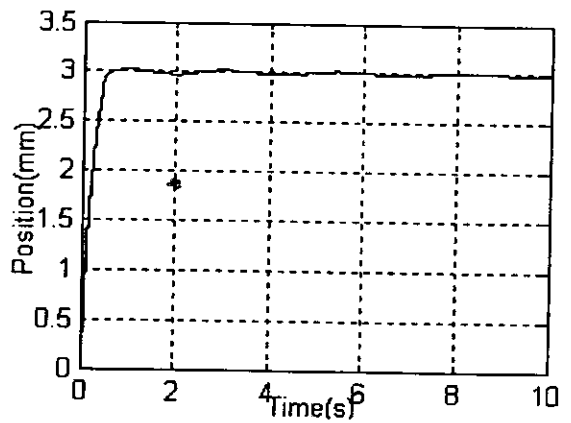
ภาพประกอบ 3-9 แสดงผลตอบสนองต่อตำแหน่งที่ 0.025 มิลลิเมตร



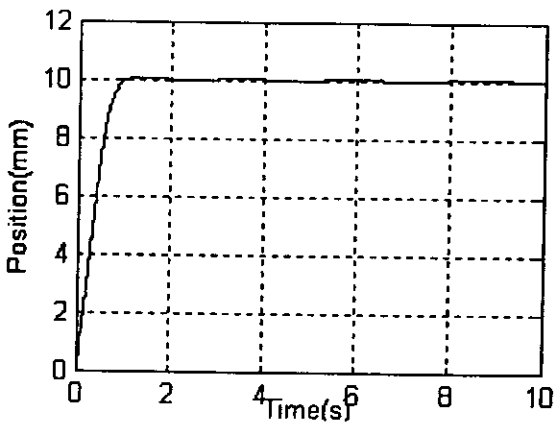
ภาพประกอบ 3-10 แสดงผลตอบสนองต่อตำแหน่งที่ 0.2 มิลลิเมตร



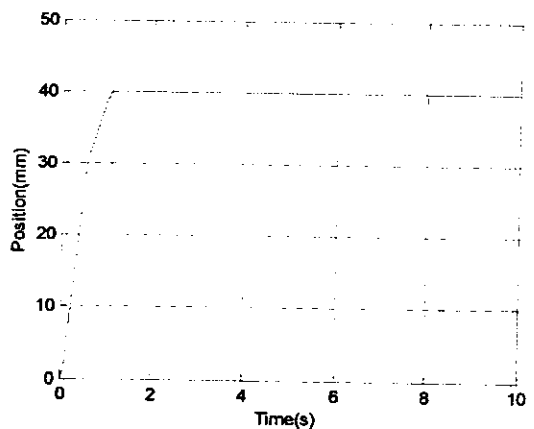
ภาพประกอบ 3-11 แสดงผลตอบสนองต่อตำแหน่งที่ 1.0 มิลลิเมตร



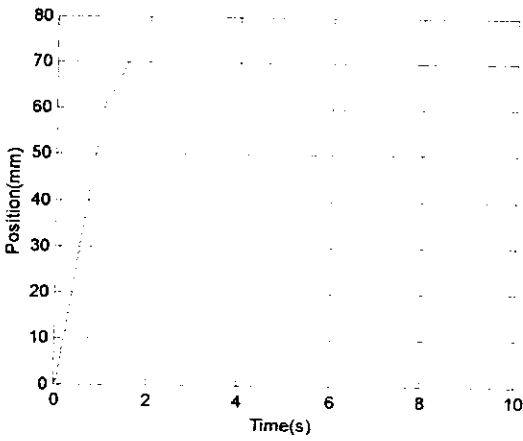
ภาพประกอบ 3-12 แสดงผลตอบสนองต่อตำแหน่งที่ 3.0 มิลลิเมตร



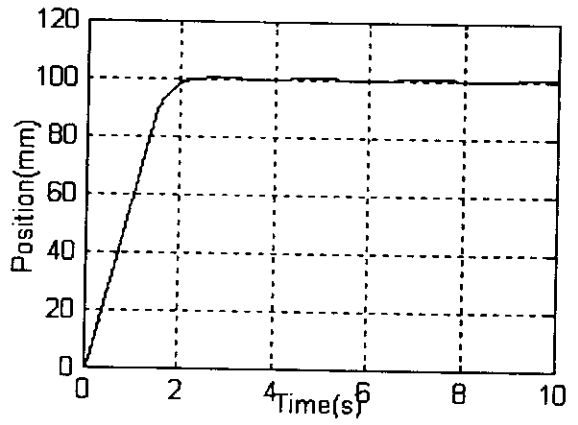
ภาพประกอบ 3-13 แสดงผลตอบสนองต่อตำแหน่งที่ 10.0 มิลลิเมตร



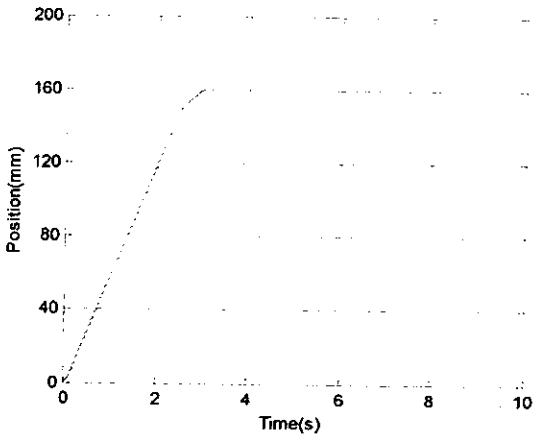
ภาพประกอบ 3-14 แสดงผลตอบสนองต่อตำแหน่งที่ 40.0 มิลลิเมตร



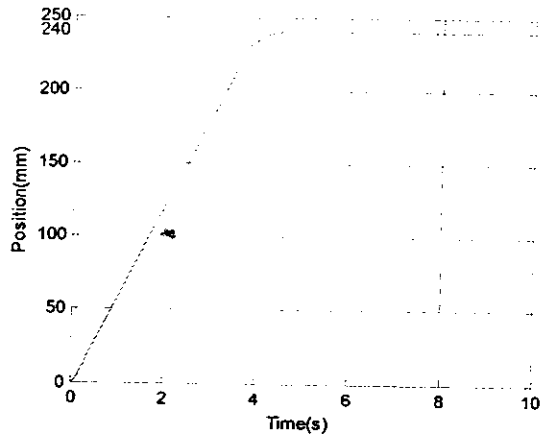
ภาพประกอบ 3-15 แสดงผลตอบสนองต่อตำแหน่ง
ที่ 70.0 มิลลิเมตร



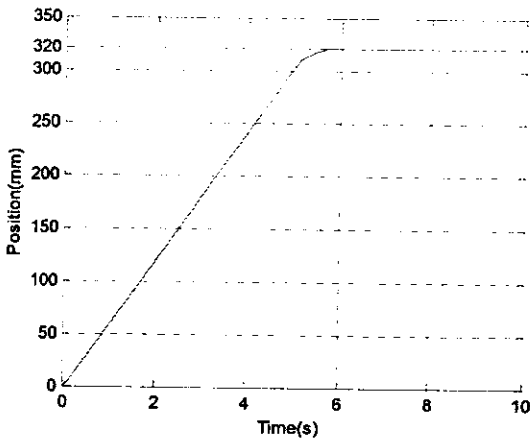
ภาพประกอบ 3-16 แสดงผลตอบสนองต่อตำแหน่ง
ที่ 100.0 มิลลิเมตร



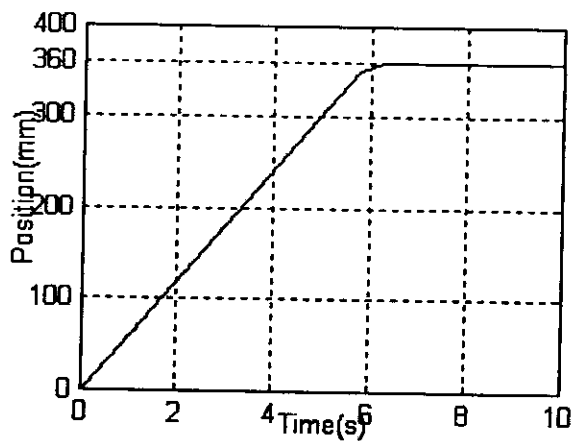
ภาพประกอบ 3-17 แสดงผลตอบสนองต่อตำแหน่ง
ที่ 160.0 มิลลิเมตร



ภาพประกอบ 3-18 แสดงผลตอบสนองต่อตำแหน่ง
ที่ 240.0 มิลลิเมตร



ภาพประกอบ 3-19 แสดงผลตอบสนองต่อตำแหน่ง
ที่ 320.0 มิลลิเมตร



ภาพประกอบ 3-20 แสดงผลตอบสนองต่อตำแหน่ง
ที่ 360.0 มิลลิเมตร

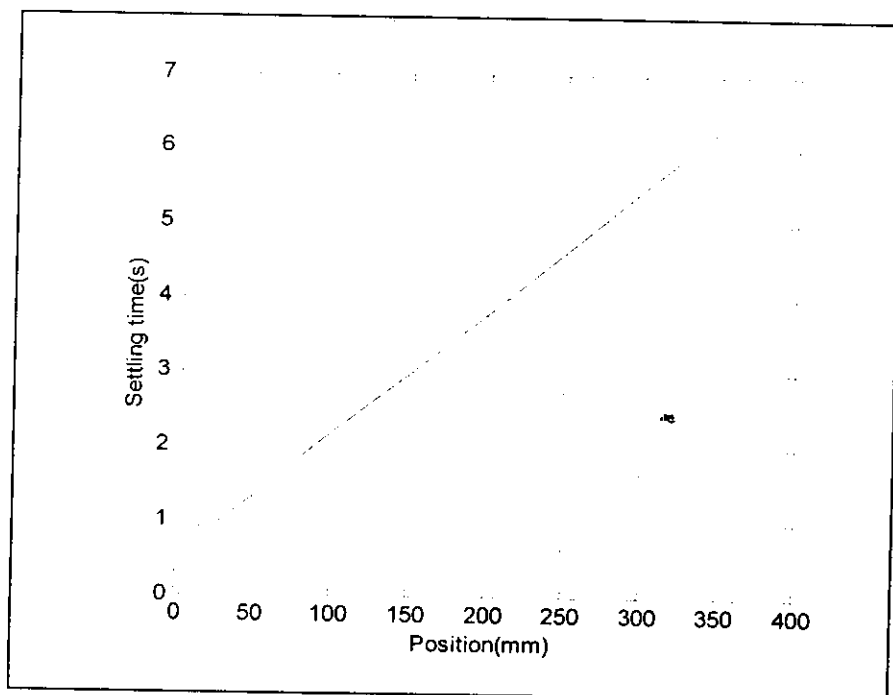
3.4.2 ผลการจำลองระบบด้วยคอมพิวเตอร์

ตาราง 3-1 ผลการจำลองระบบด้วยคอมพิวเตอร์

ค่าตำแหน่ง ที่ป้อน (mm.)	เวลาที่ใช้เฉลี่ย (วินาที)	ค่าความผิดพลาด(mm.)
0.025	0.445	0
0.075	0.254	0
0.15	0.202	0
0.2	0.175	0
0.6	0.213	0
1.0	0.292	0
1.4	0.335	0
1.8	0.410	0
2.2	0.455	0
2.6	0.487	0
3.0	0.515	0
4.0	0.596	0
5.0	0.658	0
6.0	0.725	0
7.0	0.791	0
8.0	0.841	0
9.0	0.928	0
10.0	0.989	0
20.0	0.858	0
40.0	1.181	0
60.0	1.501	0
80.0	1.825	0
100.0	2.180	0
200.0	3.782	0
300.0	5.454	0

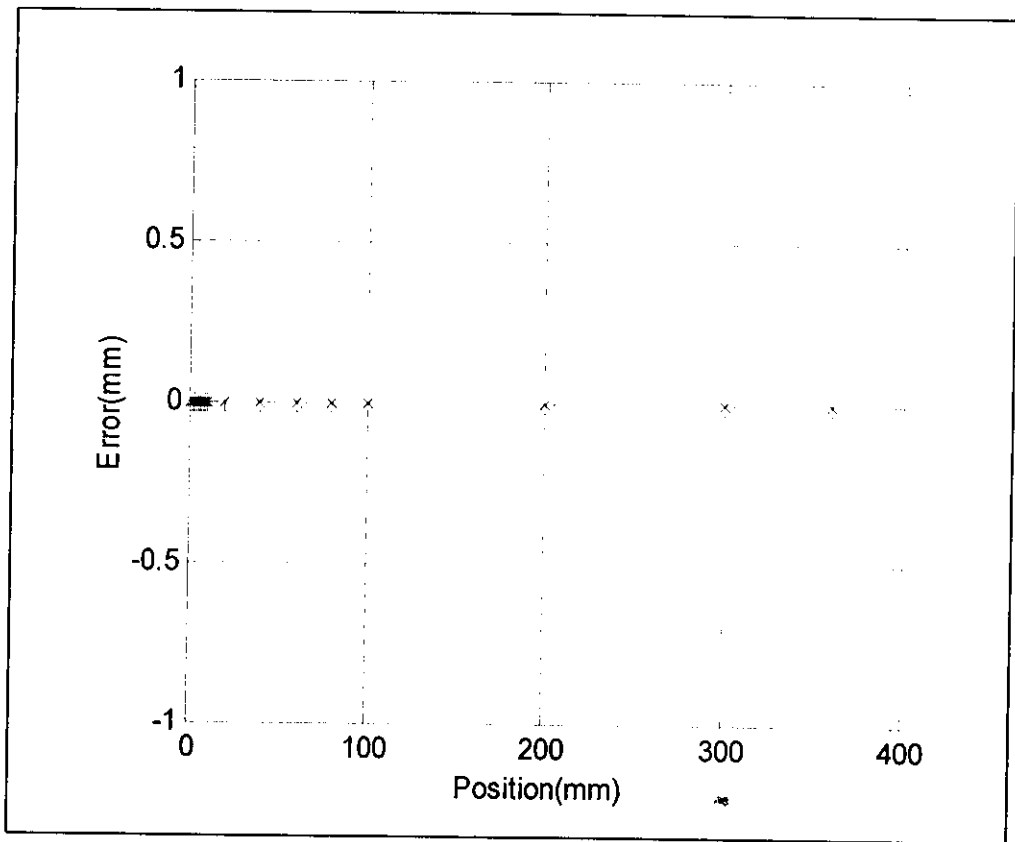
ค่าตำแหน่ง ที่ป้อน (mm.)	เวลาที่ใช้เฉลี่ย (วินาที)	ค่าความผิดพลาด(mm.)
360.0	6.432	0

จากผลการทดลองที่ได้ เราสามารถนำผลดังกล่าวมาทำการพล็อตกราฟระหว่างตำแหน่งหรือระยะทางที่ต้องการให้มอเตอร์เคลื่อนที่ไปกับค่าเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่เป้าหมาย ได้ดังนี้



ภาพประกอบ 3-21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับเวลาเข้าสู่เป้าหมาย

จากผลการทดลองเดียวกันนี้ สามารถนำผลดังกล่าวมาทำการพล็อตกราฟระหว่างตำแหน่งหรือระยะทางที่ต้องการให้มอเตอร์เคลื่อนที่ไปกับค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง ได้ดังนี้



ภาพประกอบ 3-22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับค่าความผิดพลาด

เมื่อทราบแบบจำลองของระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์และทำการจำลองการทำงานของระบบด้วยคอมพิวเตอร์แล้ว ในบทถัดไป จะกล่าวถึงการสร้างระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ที่ใช้ในเครื่องพิมพ์และตัดเหล็กจริง เพื่อศึกษาการทำงานจริงต่อไป