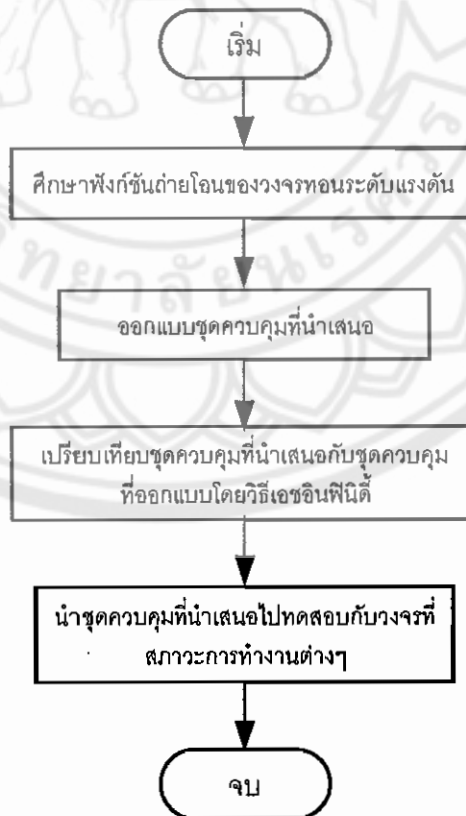


บทที่ 3

การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีแบบคงทนสำหรับวงจรถอนระดับแรงดันแบบ โหมดกระแสเฉลี่ยด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีแบบคงทนสำหรับวงจรถอนระดับแรงดันแบบโหมดกระแสเฉลี่ยด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม จะเป็นการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีที่เหมาะสมให้กับวงจรถอนระดับแรงดัน โดยเริ่มพิจารณาจากแบบจำลองพลวัตของวงจรถอนระดับแรงดันที่เป็นโหมดกระแสเฉลี่ย (Average Current Mode) [3] เพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจร เมื่อได้ฟังก์ชันถ่ายโอนแล้วก็ทำการออกแบบชุดควบคุมโดยการใช้อนุกรมวิธีเชิงพันธุกรรมหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมซึ่งนำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ และนำชุดควบคุมที่ได้ไปทดสอบกับวงจรถอนระดับแรงดันแบบโหมดกระแสเฉลี่ยในสภาวะต่างๆ เพื่อทดสอบชุดควบคุมที่โครงสร้างที่ง่ายแต่ยังคงมีสมรรถนะความคงทนที่ดีได้ ซึ่งรายละเอียดของการดำเนินงานวิจัยมีดังภาพ 21

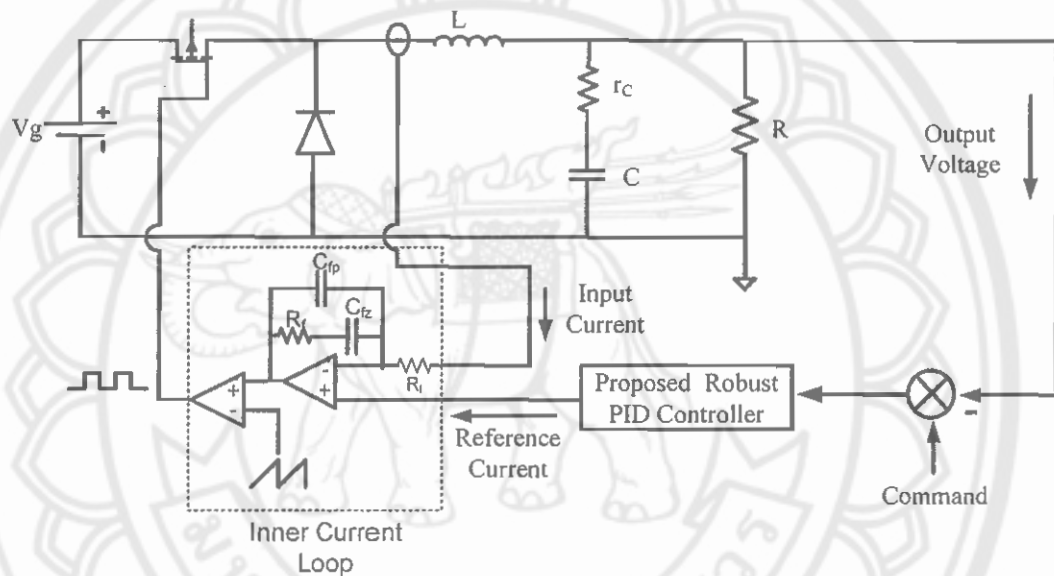


ภาพ 21 ไคอะแกรมวิธีดำเนินงานวิจัย

แบบจำลองพลวัตของวงจรทอนระดับแรงดันแบบโหมดกระแสเฉลี่ย

วงจรทอนระดับแรงดัน (Buck Converter) แบบโหมดกระแสเฉลี่ย (Average Current Mode) [3] ซึ่งจะมีฟังก์ชันถ่ายโอนจากกระแสอ้างอิง (Current Reference) ไปยังแรงดันทางด้านเอาต์พุต (Output Voltage) ดังนี้

$$\frac{V_o(s)}{V_c(s)} = \frac{K_m(1 + r_cCs)[G_{CA} + 1]G_{dv}(s)}{1 + T_c(s)} \quad (3.1)$$



ภาพ 22 ภาพวงจรทอนระดับแรงดันแบบโหมดกระแสเฉลี่ย

โดยที่วงจรทอนระดับแรงดันมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

$$V_g = 12 \text{ V}$$

$$V_o = 5 \text{ V}$$

$$R = 20 \Omega$$

$$L = 100 \mu\text{H}$$

$$C = 680 \mu\text{F}$$

$$R_s = 0.5 \Omega$$

$$r_c = 0 \Omega$$

$$V_m = 5 \text{ V}$$

$$f_s = 100 \text{ kHz}$$

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรถอนระดับแรงดันก็สามารถคำนวณหาค่าตัวควบคุมในวงรอบกระแสภายใน (Inner Current Loop) ได้ดังนี้

$$G_{CA} = \frac{K_c(1 + \frac{s}{\omega_z})}{s(1 + \frac{s}{\omega_p})} \quad (3.2)$$

โดยที่ค่า

$$G_{CA} \cong \frac{R_f}{R_l} < \min\left\{\frac{2V_{mfs}L}{V_g R_s}, \frac{V_{mfs}L}{V_o R_s}\right\} \quad (3.3)$$

เมื่อ

$$K_c = \frac{1}{R_l(C_{fp} + C_{fz})}$$

$$\omega_z = \frac{1}{R_f C_{fz}} = \frac{1}{2\sqrt{LC}}$$

$$\omega_p = \frac{C_{fz} + C_{fp}}{R_f C_{fz} C_{fp}} = \frac{f_s}{2}$$

เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรถอนระดับแรงดันจะได้

$$G_{CA} \cong \frac{R_f}{R_l} < \min\{16.67, 20\} \quad (3.4)$$

และสามารถหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมวงรอบกระแสภายในได้ดังนี้

$$R_f = 1 \text{ k}\Omega$$

$$R_l = 10 \text{ k}\Omega$$

$$C_{fz} \approx 2 \text{ nf}$$

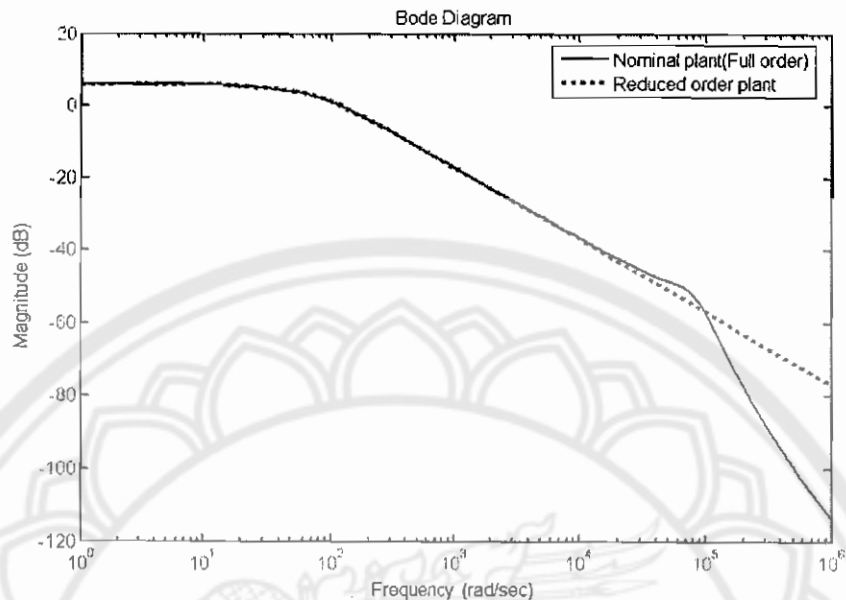
$$C_{fp} \approx 50 \text{ nf}$$

เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรถอนระดับแรงดันครบ จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรถอนระดับแรงดันแบบโหมดกระแสเฉลี่ย จากกระแสอ้างอิง (Current Reference) ไปยังแรงดันทางด้านเอาต์พุต (Output Voltage) ดังสมการที่ (3.5)

$$\frac{V_o(s)}{V_c(s)} = G = \frac{1.2 \times 10^{-15} s^5 + 7.3 \times 10^{-10} s^4 + 3.6 \times 10^{-3} s^3 + 0.076 s^2 + 531.9 s + 923000}{6.8 \times 10^{-22} s^7 + 7.9 \times 10^{-17} s^6 + 6.8 \times 10^{-12} s^5 + 2.4 \times 10^{-7} s^4 + 5.9 \times 10^{-4} s^3 + 3.674 s^2 + 6943 s + 461000} \quad (3.5)$$

เมื่อลดรูปสมการ (3.5) จะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.6)

$$\frac{V_o(s)}{V_c(s)} = G = \frac{531.9 s + 923100}{3.674 s^2 + 6943 s + 461500} \quad (3.6)$$



ภาพ 23 แผนภาพโบดของระบบก่อนลดรูปและหลังลดรูป

จากภาพ 23 จะแสดงแผนภาพโบดของระบบก่อนลดรูปและหลังลดรูป โดยระบบทั้งสองจะมีอัตราขยายในช่วงความถี่ต่างๆ ใกล้เคียงกัน แต่ระบบที่ลดรูปแล้วจะง่ายต่อการสังเคราะห์ชุดควบคุมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์

การออกแบบตัวควบคุมแบบจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้ (H_∞ Loop Shaping) ที่กำหนดโครงสร้างได้ด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม สำหรับวงจรถอบระดับแรงดันแบบโหมดกระแสเฉลี่ย

ตัวควบคุมที่ออกแบบขึ้นในหัวข้อที่ 2.5 นั้นต้องอาศัยการหาตัวควบคุมโดยการแก้สมการรีคาติในขั้นตอนที่ 3 ซึ่งทำให้มีโครงสร้างตัวควบคุมที่ซับซ้อน ลำดับสูงและยากต่อการนำไปใช้งาน ผู้วิจัยจึงนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมที่กำหนดโครงสร้างได้ด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

วิธีการที่ผู้วิจัยนำเสนอจะพัฒนามาจากวิธีการของ McFalane et. al. [6] ในหัวข้อที่ 2.5 โดยในขั้นตอนแรกจะกำหนดโครงสร้างของตัวควบคุมที่จะออกแบบขึ้นเป็น $K(p)$ เมื่อ p คือเวกเตอร์พารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ต้องการออกแบบเพื่อให้ระบบได้ตามต้องการ โครงสร้างนี้อาจออกแบบเป็นตัวควบคุมแบบเชิงเส้นแบบใดก็ได้ อาทิเช่น PI, PID ฯลฯ จากนั้น หากพิจารณาสมการที่ (2.23) ได้ว่า

$$K(p) = W_1 K_\infty W_2 \quad (3.7)$$

$$K_\infty W_2 = \frac{K(p)}{W_1} \quad (3.8)$$

โดยกำหนดให้ $W_1^{-1} \in \mathcal{H}H_\infty$ และให้ $W_2 = I$ คือค่าคงที่ เพราะว่าจะไม่นำเรื่องการชดเชยเรื่องสัญญาณรบกวนของตัวตรวจจับสัญญาณ

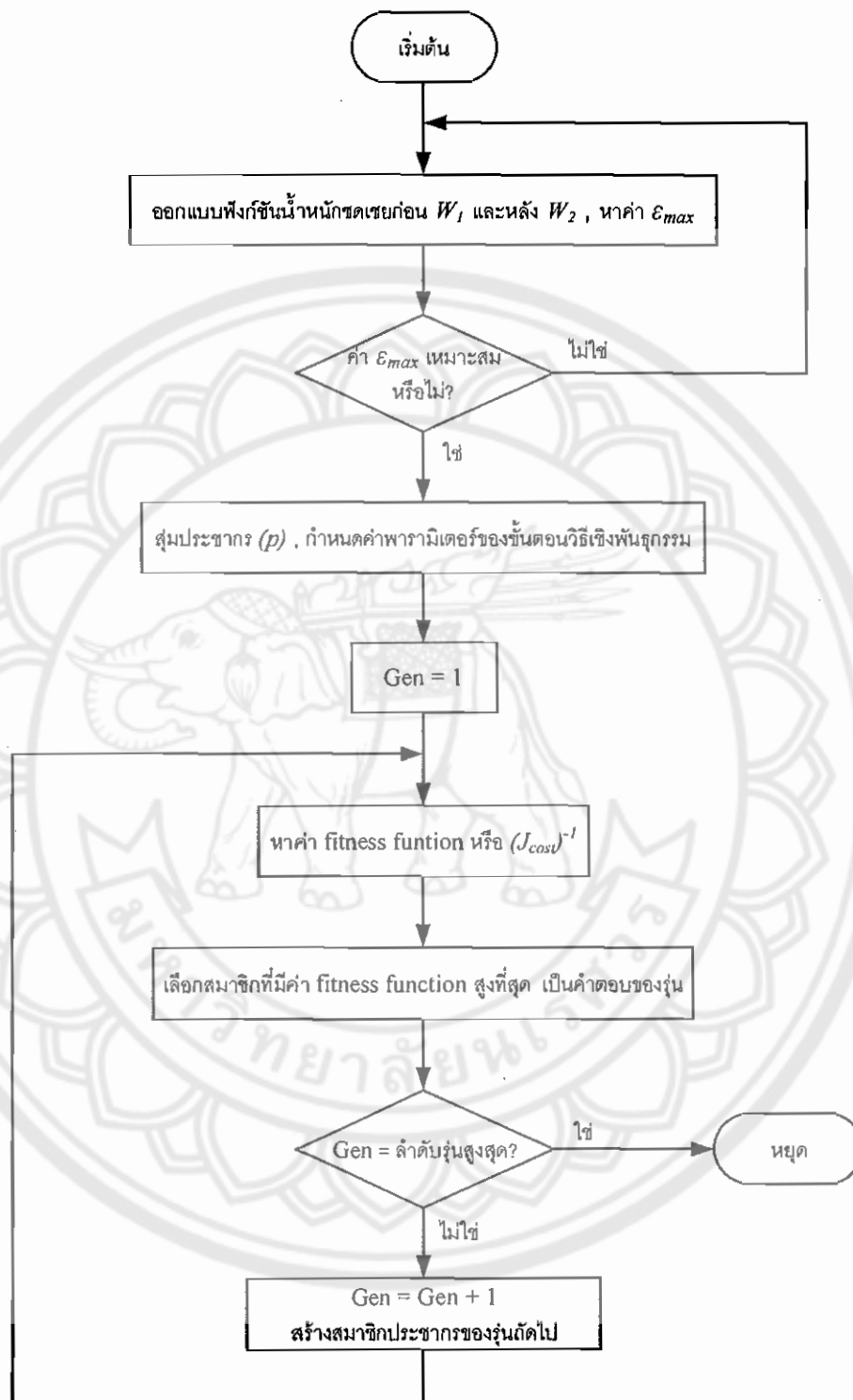
$$K_\infty = \frac{K(p)}{W_1} \quad (3.9)$$

นำค่า K_∞ แทนค่าในสมการของที่ (3.9) ลงในสมการที่ (3.10) ซึ่งหากต้องการหาตัวควบคุม $K(p)$ ที่เหมาะสมที่สุด ตัวควบคุมนั้นจะต้องทำให้ค่าของสมการที่ (3.10) มีค่าน้อยที่สุด ดังนั้น ปัญหาในการออกแบบชุดควบคุมจะต้องกำหนดให้ $\|T_{zw}\|_\infty$ เป็นฟังก์ชัน $J_{\cos r}$ ที่ต้องการให้ มีค่าต่ำที่สุด การออกแบบจะต้องหาค่าพารามิเตอร์ p ที่ทำให้ได้ค่า $J_{\cos r}$ มีค่าต่ำที่สุด โดยที่

$$J_{\cos r} = \|T_{zw}\|_\infty = \left\| \begin{bmatrix} I \\ W_1^{-1} K(p) \end{bmatrix} (I + G W_1^{-1} K(p))^{-1} M_r^{-1} \right\|_\infty \quad (3.10)$$

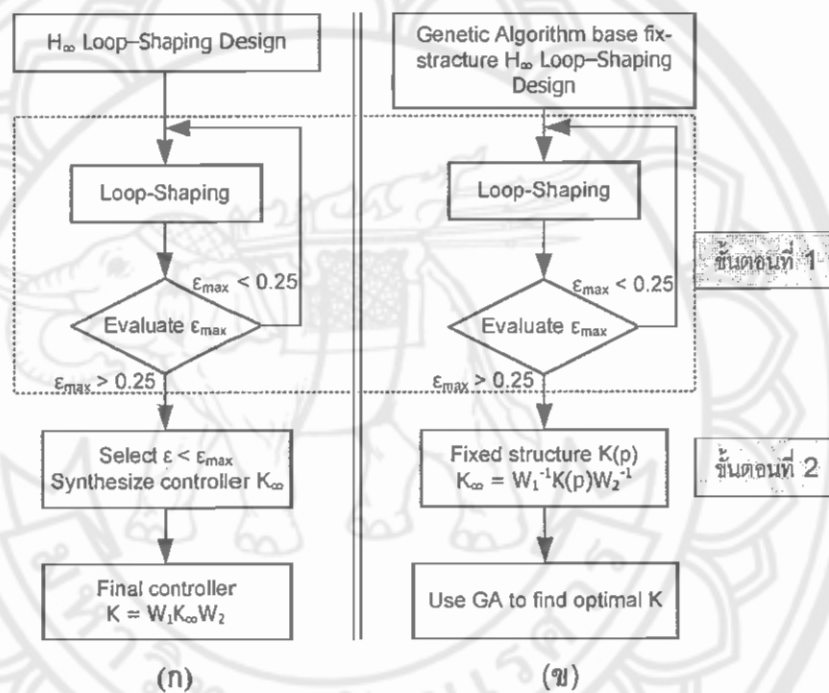
ผู้วิจัยนำเสนอขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการหาค่าพารามิเตอร์ p ที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้ส่วนกลับของสมการที่ (3.10) เป็นฟังก์ชัน Fitness ซึ่งจะทำให้ระบบควบคุมมีค่านอร์มอนันต์ (Infinity norm) ของฟังก์ชันถ่ายโอนจากตัวรบกวนไปยังสเตท ($\|T_{zw}\|_\infty$) ต่ำที่สุด

สำหรับการประยุกต์ใช้กับปัญหาการออกแบบตัวควบคุมโดยวิธานิพนธ์นี้ จะมีขั้นตอนดังแสดงในภาพ 24



ภาพ 24 แผนผังการทำงานของกรออกแบบขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม [7]

จากภาพ 25 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างการออกแบบตัวควบคุมที่นำเสนอกับการออกแบบแบบเดิมของ McFalane et. al. [6] จากรูปจะเห็นได้ว่า ขั้นตอนที่แตกต่างกันระหว่างสองวิธีการคือขั้นตอนที่สองใน Flow Chart โดยที่ชุดควบคุมที่ออกแบบโดยวิธีเอชอินฟินิตี้จะต้องกำหนดค่า (ϵ) ให้มีค่าต่ำกว่าส่วนเมื่อเสถียรภาพสูงสุด (ϵ_{max}) เล็กน้อย แล้วสังเคราะห์ชุดควบคุม (K_∞) ขึ้นมา ส่วนวิธีที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้จะหาค่าพารามิเตอร์ของชุดควบคุมที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าเมื่อเสถียรภาพสูงสุด (ϵ)



ภาพ 25 เปรียบเทียบการสังเคราะห์ชุดควบคุมระหว่าง (ก) ชุดควบคุมแบบจัดสรรฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้ และ (ข) ชุดควบคุมแบบจัดสรรฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้ที่กำหนดโครงสร้างได้ด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

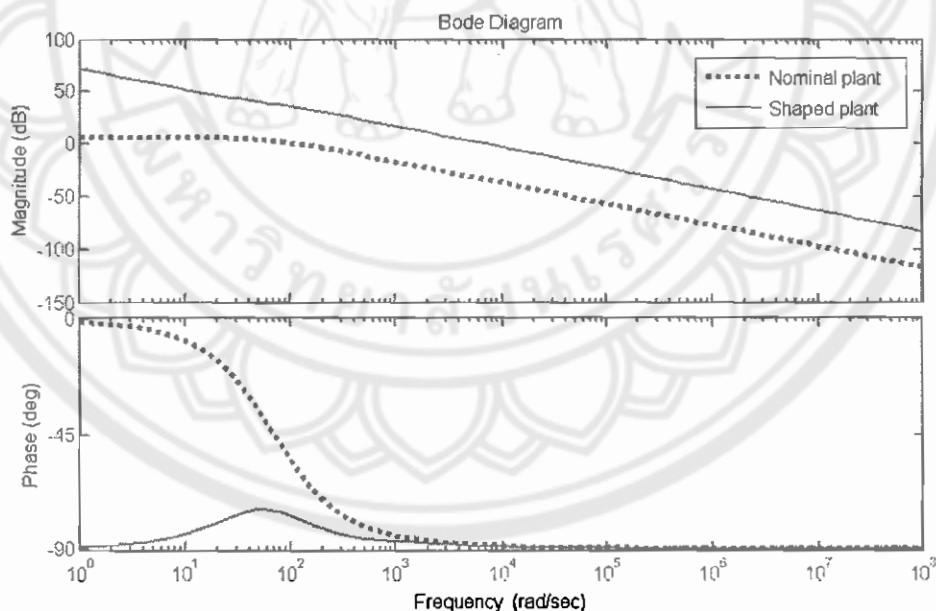
การออกแบบวงจรถอบคุมตามวิธีการที่นำเสนอจะแสดงได้ตามขั้นตอนต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 จะต้องมีการกำหนดค่าฟังก์ชันน้ำหนักก่อน (W_1) และหลัง (W_2) โดยต้องออกแบบให้ค่าส่วนเผื่อเสถียรภาพ (ε_{opt}) มีค่ามากกว่า 0.25 ดังภาพ 24 หากไม่เป็นดังนี้ จะต้องกำหนดค่าฟังก์ชันน้ำหนักใหม่ การออกแบบระบบให้มีสมรรถนะที่ดีโดยการจัดสรรฐานของระบบด้วยฟังก์ชันน้ำหนักชดเชยก่อน W_1 และฟังก์ชันน้ำหนักชดเชยหลัง W_2 จะเลือกฟังก์ชันน้ำหนักชดเชยดังนี้

$$W_1 = \frac{50s + 2000}{s + 0.001}, W_2 = 1 \quad (3.11)$$

$$G_s = W_2 G W_1 = \left(\frac{531.9s + 923100}{3.674s^2 + 6943s + 461500} \right) \frac{50s + 2000}{s + 0.001} \quad (3.12)$$

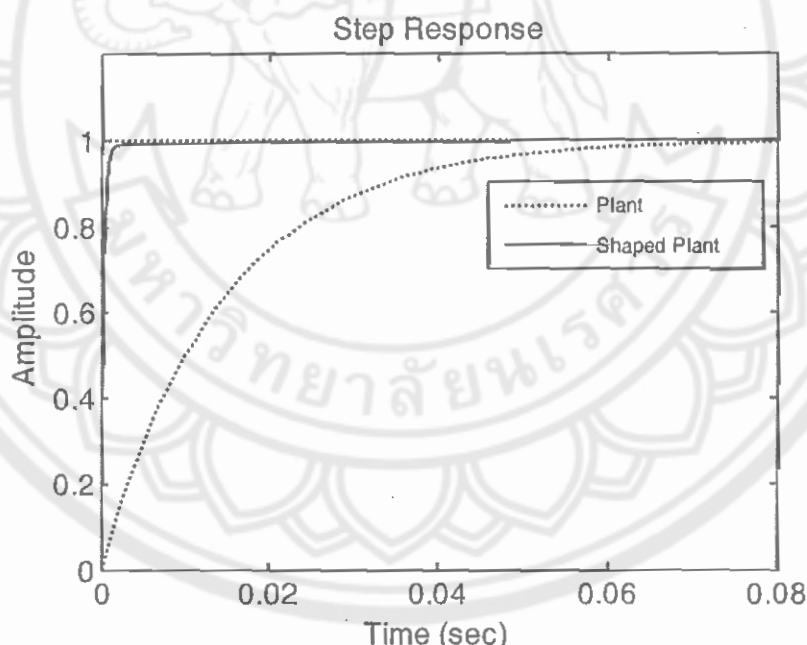
จากสมการที่ (3.12) สามารถหาค่าส่วนเผื่อเสถียรภาพ (ε_{opt}) ที่เหมาะสมที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.7112 (ซึ่งมากกว่า 0.25 มาก) แสดงว่าฟังก์ชันน้ำหนักชดเชยก่อน W_1 ที่ออกแบบขึ้นมา นั้นมีความเหมาะสม และพิจารณาฟังก์ชันน้ำหนักชดเชยก่อน W_1 จะต้องทำให้ระบบที่ทำการจัดสรรฐานวงรอบมีเสถียรภาพ



ภาพ 26 ภาพการเปรียบเทียบแผนภาพโบดของระบบก่อนจัดสรรฐานวงรอบ และแผนภาพโบดของระบบหลังจัดสรรฐานวงรอบของวงจรถอบ ระดับแรงดัน

จากภาพ 26 เป็นแผนภาพโบดของระบบ จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อมีการจัดสรรฐานแล้ว จะมีค่าแบนวิดท์ของระบบเพิ่มจาก 100 rad/s เป็นประมาณ 9000 rad/s และมีอัตราการขยายในช่วงความถี่ต่ำสูง จากภาพ 26 จะมีอัตราการขยายที่ความถี่ 10 rad/sec จะพบว่าระบบก่อนจัดสรรฐานมีค่าอัตราการขยายประมาณ 5 เท่า และระบบหลังจัดสรรฐานมีค่าอัตราการขยายประมาณ 58 เท่า ซึ่งหมายถึงสมรรถนะและความคงทนที่ดีขึ้นและมีค่าแบนวิดท์กว้างขึ้น และมีเฟสเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 180 องศา เพราะว่าถ้าเฟสมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่า 180 องศา จะทำให้ระบบมีอัตราการขยายเป็นลบ

เมื่อนำระบบก่อนและหลังจัดสรรฐานที่ได้มาพล็อตกราฟเปรียบเทียบการตอบสนองต่อเวลาของระบบทั้งสองดังภาพ 27 จะพบว่าระบบหลังจัดสรรฐานจะมีการ tracking command ได้ดีกว่า เพราะว่าระบบที่จัดสรรฐานแล้วจะลู่เข้าสู่เป้าหมายได้ดีกว่า ซึ่งหมายถึงระบบจะมีการตอบสนองต่อคำสั่งได้ดีกว่า ดังนั้นในแง่ของสมรรถนะถือว่าการออกแบบระบบด้วยฟังก์ชันชดเชยน้ำหนักรสามารถทำได้ดี

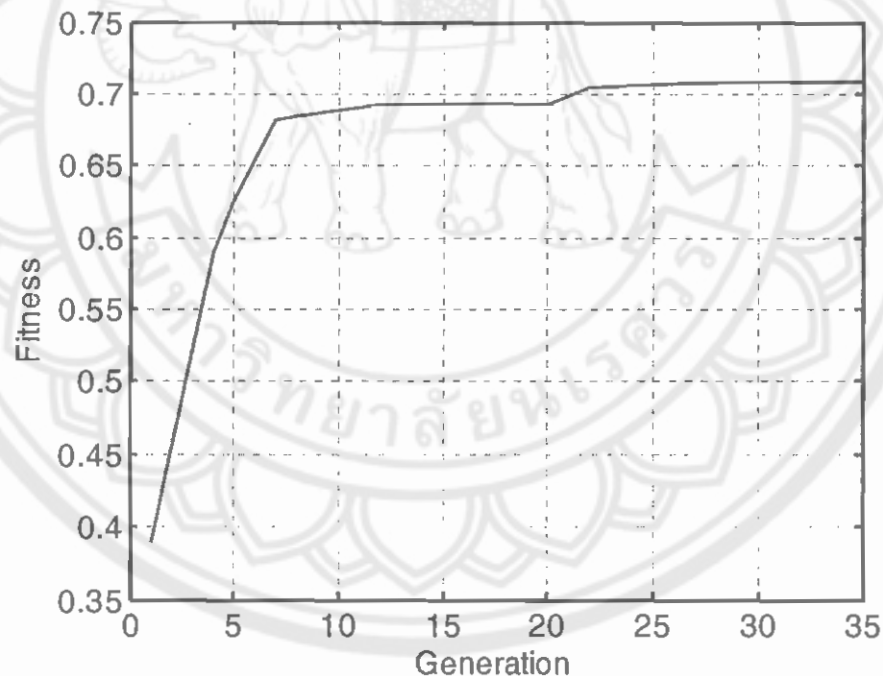


ภาพ 27 ภาพการตอบสนองของระบบก่อนและหลังจัดสรรฐาน

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดโครงสร้างของตัวควบคุมชั้น ($K(p)$) จากนั้นทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม โดยวิธีการที่นำเสนอจะกำหนดโครงสร้างของตัวควบคุมให้เป็นแบบ ตัวควบคุมแบบพีไอดี ซึ่งโครงสร้างของตัวควบคุมนี้มีลักษณะดังนี้

$$K(P) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d}{t_d s + 1} \quad (3.13)$$

ดังนั้น พารามิเตอร์ที่ต้องการหา คือ $p=[K_p, K_i, K_d, t_d]$ โดยกำหนดช่วงของค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมดังนี้ $K_p \in [0 \ 200]$, $K_i \in [0 \ 3000]$, $K_d \in [0 \ 0.1]$, $t_d \in [0 \ 0.01]$ แล้วใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการหาค่าพารามิเตอร์ K_p , K_i , K_d และ t_d ที่เหมาะสมที่สุด ค่าพารามิเตอร์ของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมีดังนี้ population size = 500, operator probability : crossover = 0.6, mutation = 0.05, maximum generation = 35 เมื่อถึงรุ่นที่ 27 ค่าที่เหมาะสมที่สุดสามารถหาค่าตอบได้ ดังแสดงในภาพ 28



ภาพ 28 ค่าฟิตเนสของคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละรุ่น ตั้งแต่รุ่นที่ 1 ถึง 35

เมื่อดำเนินการเชิงพันธุกรรมเสร็จสิ้น จะได้พารามิเตอร์ p ที่ทำให้ตัวควบคุมเหมาะสมที่สุด และเป็นไปตามโครงสร้างที่กำหนดขึ้น $K(p)$ คือ

$$K = 49.6 + \frac{2543.2}{s} + \frac{0.00028s}{0.00095s + 1} \quad (3.14)$$

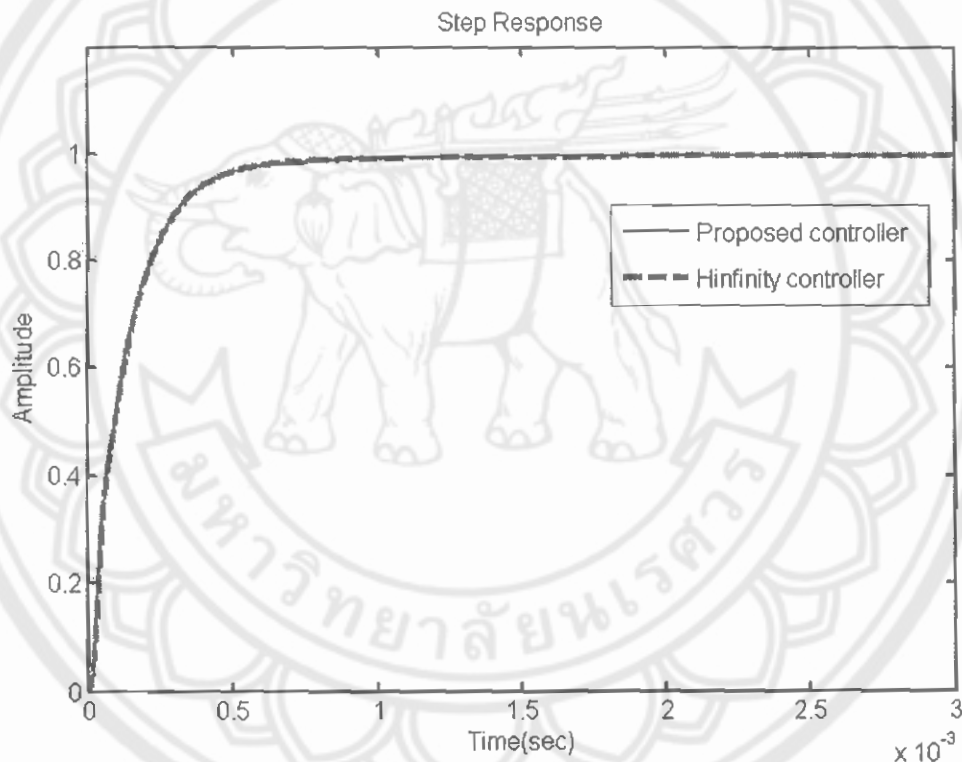
โดยมีค่าเมื่อเสถียรภาพ (ε) เท่ากับ 0.70779

จากผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบตัวควบคุมจึงได้ทำการออกแบบตัวควบคุมจากวิธีการจัดสรรฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้ในหัวข้อที่ 2.4 ซึ่งจะได้ตัวควบคุม K คือ

$$K = W_1 K_c W_2 \quad (3.15)$$

$$K(s) = W_1 K_c W_2 = \frac{(50s + 2000)(2093474)(s + 1765)(s + 40.34)}{(s + 0.001)(s + 2.125 \times 10^6)(s + 1739)(s + 40)} \quad (3.16)$$

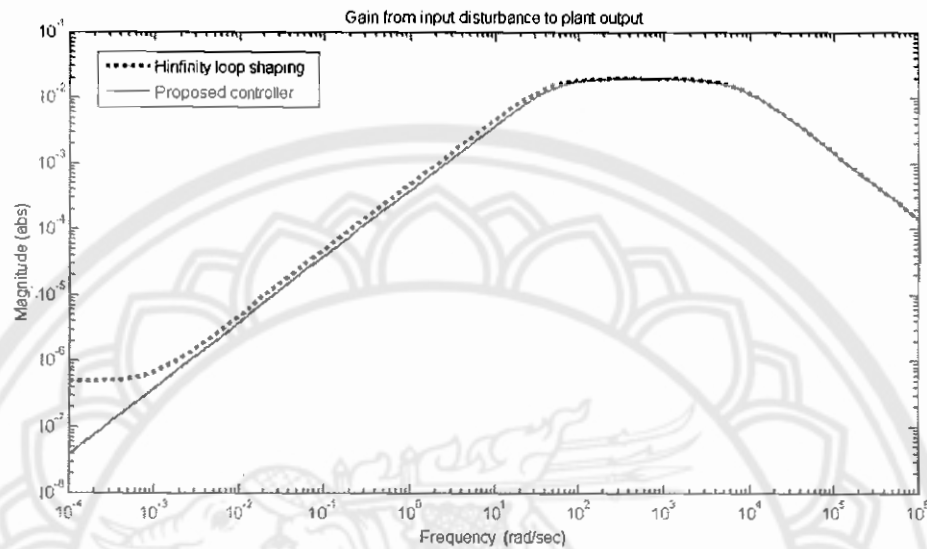
โดยมีค่าเมื่อเสถียรภาพ (ε) เท่ากับ 0.71 จากสมการที่ 3.16 จะเห็นว่าตัวควบคุมที่ออกแบบมีลำดับเท่ากับ 4 และอาจจะยุ่งยากต่อการออกแบบชุดควบคุม



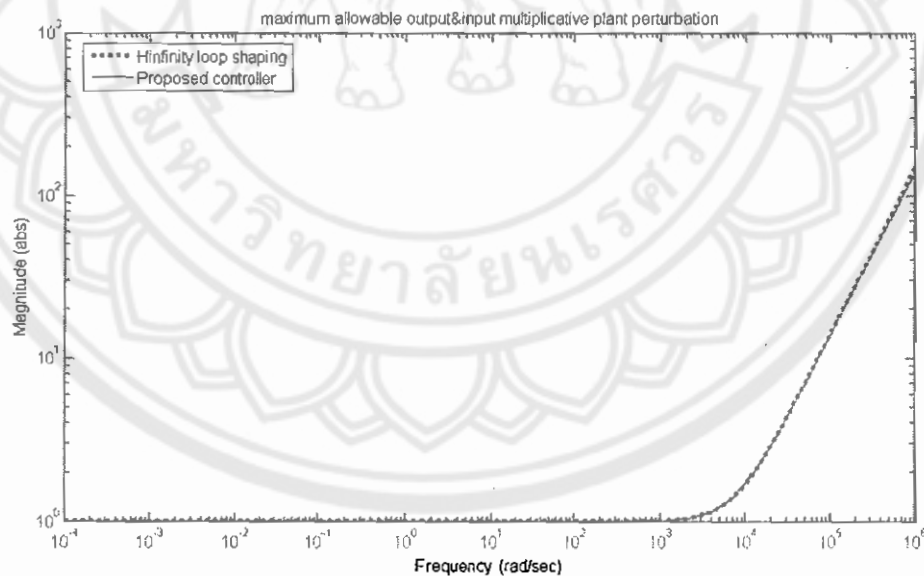
ภาพ 29 ภาพการตอบสนองฟังก์ชันขั้นบันไดของตัวควบคุมที่ได้จากการจัดสรรฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้ และตัวควบคุมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้

เมื่อมีการเปรียบเทียบค่าส่วนเมื่อเสถียรภาพของตัวควบคุม จะพบว่าตัวควบคุมที่ผู้วิจัยนำเสนอจะค่าส่วนเมื่อเสถียรภาพน้อยกว่าชุดควบคุมที่ได้จากการจัดสรรฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้เล็กน้อย แต่ชุดควบคุมที่ได้นี้จะมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและง่ายต่อการนำไปใช้งานจริง ภาพ 29 แสดงผลการจำลองการทำงานของตัวควบคุมทั้งสองแบบ พบว่าทั้งสองแบบให้ค่าผลตอบสนอง

ต่อฟังก์ชันขั้นบันไดได้ไม่แตกต่างกันมาก ค่า Rise time ของระบบอยู่ที่ประมาณ 0.0012 วินาที ซึ่งถือว่าเป็นระบบที่มีการตอบสนองไวมาก



ภาพ 30 อัตราการขยายจากตัวรบกวนไปยังเอาต์พุต



ภาพ 31 กราฟ multiplicative plant perturbation

ภาพ 31 จะเป็นอัตราการขยาย (Gain) จากตัวรบกวน (Disturbance) ไปยังเอาต์พุตของระบบ เมื่อสมมติว่าพิจารณาที่ความถี่ 10^{-1} rad/sec จะพบว่าม้อัตราการขยายตัวรบกวนที่เข้ามาในระบบไปยังเอาต์พุตของระบบเท่ากับ 10^5 เท่า ซึ่งก็ถือว่ามีอัตราการขยายที่น้อยมาก และอัตรา

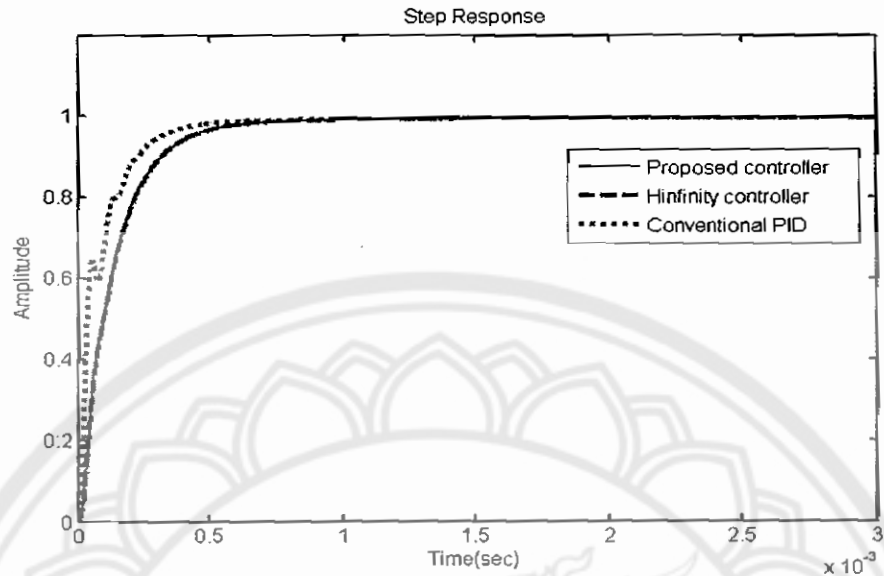
การขยายของตัวควบคุมที่นำเสนอมีค่าใกล้เคียงกับตัวควบคุมแบบเอชอินฟินิตี้ ส่วนภาพ 31 จะเป็นกราฟ multiplicative plant perturbation ซึ่งปกติแล้วในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการออกแบบชุดควบคุมโดยใช้วิธี normalized coprime factorization แต่จากสมการที่ (2.73) จะมี 4 บล็อก และก็จะมีส่วนหนึ่งที่ถูกรออกแบบเป็นแบบ multiplicative ทำให้ตัวควบคุมที่นำเสนอนี้สามารถถาวรในเชิง multiplicative ได้อีกด้วย

เพื่อทดสอบความคงทนต่อพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงในระบบ ในวิทยานิพนธ์นี้จึงทดลองเปลี่ยนค่าโหลด ความจุของตัวเก็บประจุ และเปลี่ยนค่าความเหนียว ซึ่งส่งผลให้ระบบมีการเปลี่ยนแปลง และเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (PID controller) ที่ปรับด้วยมือโดยใช้วิธีการ trial and error จนให้มีเวลาการตอบสนองใกล้เคียงกับเวลาการตอบสนองของชุดควบคุมที่นำเสนอเมื่อระบบยังไม่มี การเปลี่ยนพารามิเตอร์ (Normal Plant) โดยที่ชุดควบคุม (PID controller) ที่ปรับด้วยมือมีค่าพารามิเตอร์ดังสมการที่ (3.17)

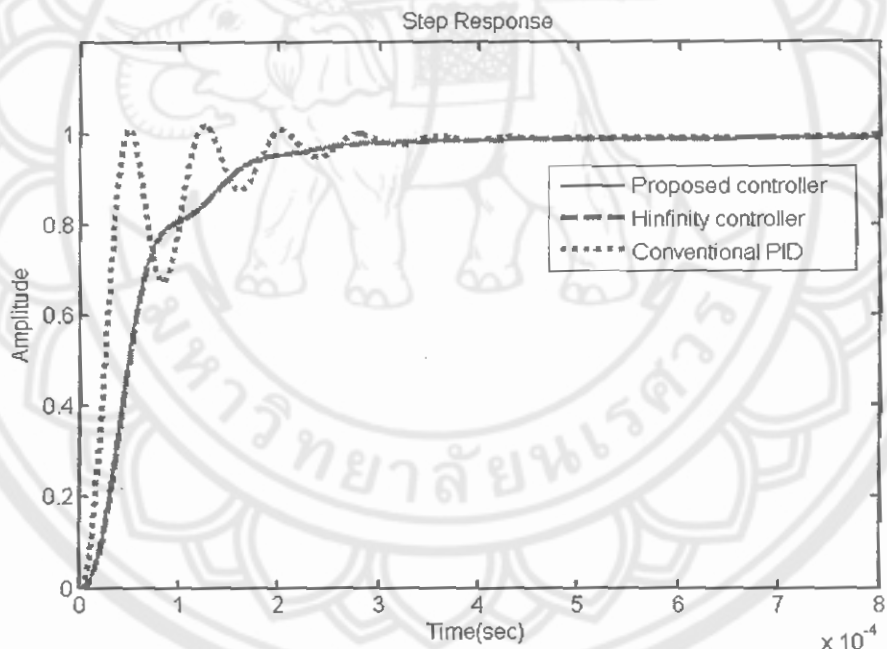
$$K = 80 + \frac{1000}{s} + \frac{0.002s}{0.0001s + 1} \quad (3.17)$$

ตาราง 15 แสดงค่าพารามิเตอร์ของระบบก่อนและหลังเปลี่ยนพารามิเตอร์

ระบบก่อนเปลี่ยนพารามิเตอร์ (Normal Plant)	ระบบหลังเปลี่ยนพารามิเตอร์ (Vary Plant)
$R = 20 \Omega$	$R = 14 \Omega$
$L = 100 \mu H$	$L = 130 \mu H$
$C = 680 \mu F$	$C = 470 \mu F$

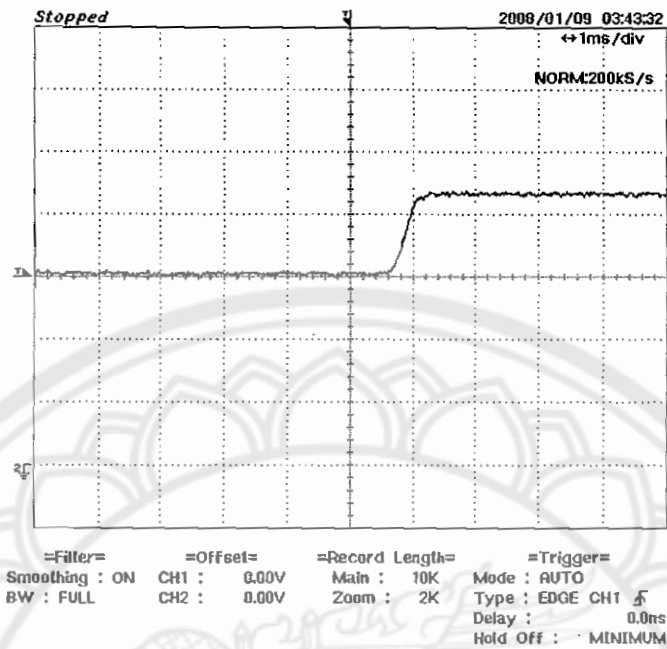


(ก)

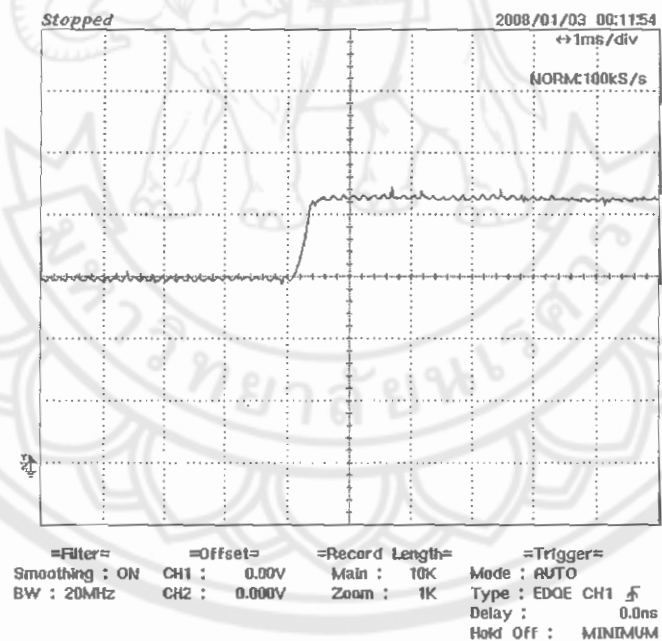


(ข)

ภาพ 32 ภาพเปรียบเทียบการตอบสนองของชุดควบคุมที่นำเสนอ ชุดควบคุมที่ใช้วิธีเอชอินฟินิตี้ และชุดควบคุมที่ปรับด้วยมือที่การจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ (ก) ผลตอบสนองฟังก์ชันขั้นบันไดของระบบก่อนเปลี่ยนพารามิเตอร์ และ (ข) ตอบสนองฟังก์ชันขั้นบันไดของระบบหลังเปลี่ยนพารามิเตอร์

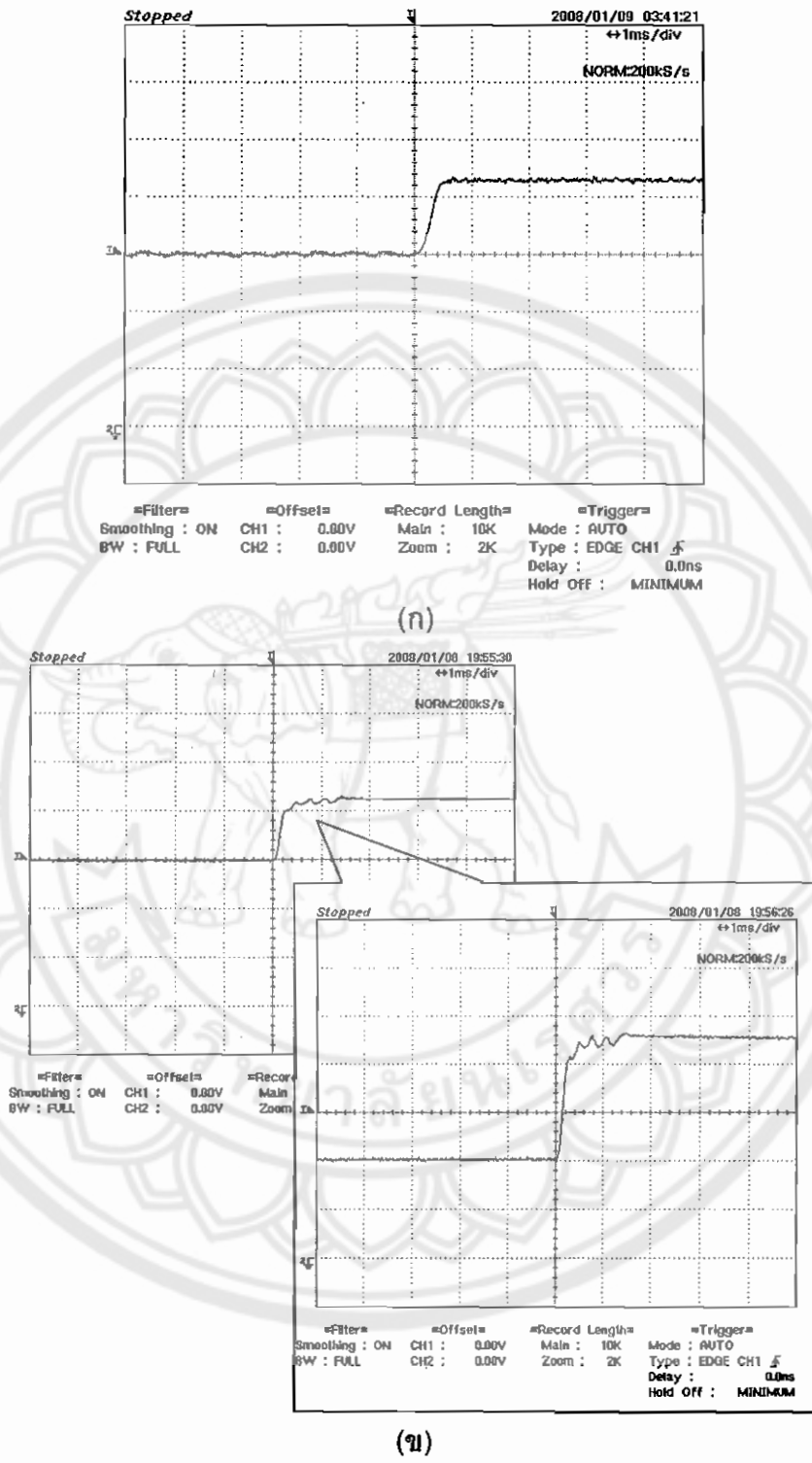


(ก)



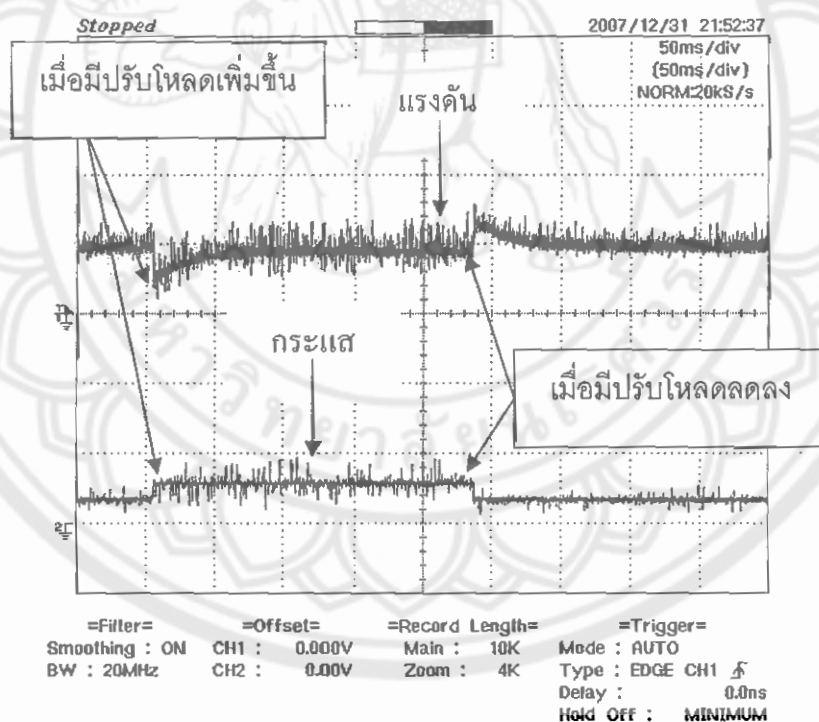
(ข)

ภาพ 33 ภาพเปรียบเทียบผลการทดลองจริงของการตอบสนองของชุดควบคุมที่นำเสนอ
 (ก) ผลตอบสนองฟังก์ชันขั้นบันไดของระบบก่อนเปลี่ยนพารามิเตอร์ และ
 (ข) ตอบสนองฟังก์ชันขั้นบันไดของระบบหลังเปลี่ยนพารามิเตอร์

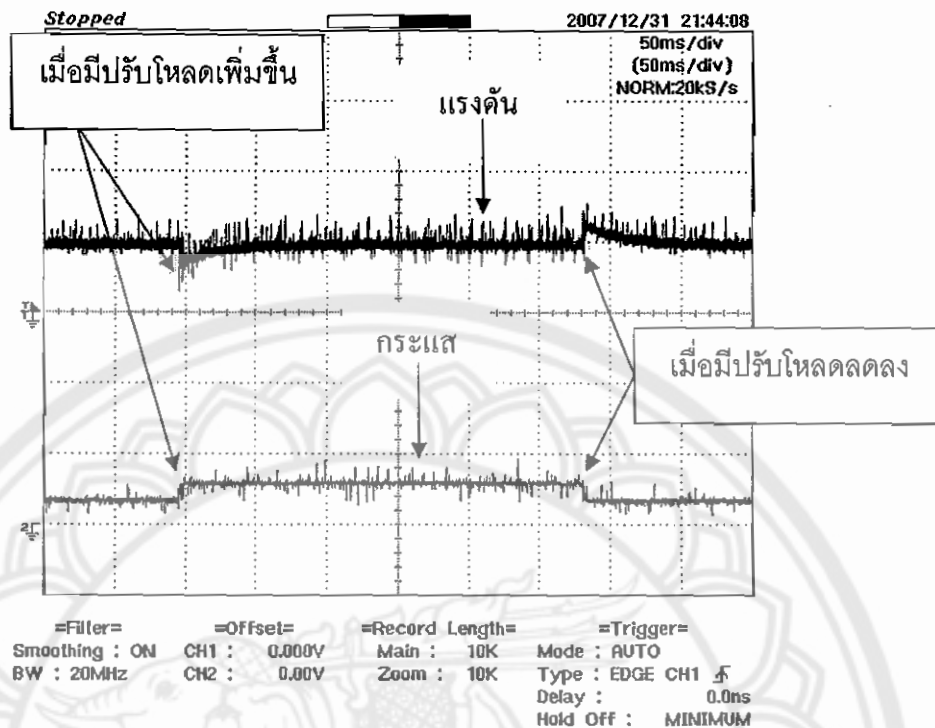


ภาพ 34 ภาพเปรียบเทียบผลการทดลองจริงของการตอบสนองของชุดควบคุมที่ปรับด้วยมือ (ก) ผลตอบสนองฟังก์ชันขั้นบันไดของระบบก่อนเปลี่ยนพารามิเตอร์ และ (ข) ตอบสนองฟังก์ชันขั้นบันไดของระบบหลังเปลี่ยนพารามิเตอร์

จากภาพ 32 (ก) 33 (ก) และ 34 (ก) แสดงผลตอบสนองของระบบก่อนเปลี่ยนพารามิเตอร์ จะพบว่า การตอบสนองต่อเวลาของระบบที่ถูกควบคุมด้วยชุดควบคุมที่นำเสนอละชุดควบคุมที่ปรับด้วยมือจะมีลักษณะใกล้เคียงกัน เมื่อมีการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของระบบ จากภาพ 33 (ข) จะพบว่าระบบที่ควบคุมด้วยชุดควบคุมที่นำเสนอมีการตอบสนองฟังก์ชันขั้นบันไดใกล้เคียงกับการตอบสนองของระบบก่อนมีการเปลี่ยนพารามิเตอร์ ส่วนชุดควบคุมที่ปรับด้วยมือเมื่อมีการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของระบบจะทำให้เกิดการออสซิลเลต (osillate) ขึ้นดังภาพ 34 (ข) ส่วนภาพ 35 และ 36 จะแสดงการตอบสนองของระบบเมื่อมีเปลี่ยนแปลงโหลดอย่างทันทีทันใดของชุดควบคุมแบบที่นำเสนอละชุดควบคุมแบบจูนมือ ตามลำดับ ซึ่งชุดควบคุมทั้งสองแบบก็สามารถปรับระดับแรงดันให้คงที่ได้ จากตรงนี้จะพบว่าชุดควบคุมทั้งสองแบบจะตอบสนองแบบ load changing ได้ดีทั้งคู่ แต่จะตอบสนองแบบ parameter changing จะแตกต่างกันอย่างชัดเจน



ภาพ 35 ภาพการตอบสนองของระบบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดของชุดควบคุมแบบที่นำเสนอละชุดควบคุมแบบจูนมือ



ภาพ 36 ภาพการตอบสนองของระบบเมื่อมีการเปลี่ยนโหลดของชุดควบคุมแบบจูนมือ

สรุปผลการทดลอง

ในบทนี้ได้นำเสนอการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรถอนระดับแรงดันแบบโหมดกระแสเฉลี่ย สำหรับนำไปสังเคราะห์ชุดควบคุมแบบจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้ และชุดควบคุมแบบจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้ ที่กำหนดโครงสร้างได้ด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม และมีการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์จะพบว่าชุดควบคุมทั้งสองวิธีที่กล่าวมาข้างต้นมีผลต่อการตอบสนองฟังก์ชันขั้นบันไดใกล้เคียงกัน และทดสอบการทำงานจริงของวงจรถอนระดับแรงดันที่ถูกควบคุมโดยชุดควบคุมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้และชุดควบคุมที่ปรับด้วยมือ เมื่อมีพารามิเตอร์ภายในระบบเปลี่ยนแปลง ก็พบว่าวงจรถอนระดับแรงดันที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ก็ยังมีเสถียรภาพอยู่และมีการตอบสนองที่ไวได้