

การออกแบบตัวควบคุมแบบคงทนที่กำหนดโครงสร้างได้สำหรับวงจรทระดับแรงดัน แบบโหมดกระแสดด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

Design of Robust Fixed-Structure H infinity Control for a Current-Mode Boost Converter using Genetic Algorithms

ปิยะพงษ์ โอพารทิตาชาต สมยศ เกียรติวนิชวิไล*

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

อ.เมือง พิษณุโลก 65000

E-mail: somyotk@nu.ac.th, sy1996@hotmail.com

บทคัดย่อ

การออกแบบระบบควบคุมแบบคงทนโดยวิธีเอชอินฟินิตี (H infinity) เป็นวิธีที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิจัยทางด้านระบบควบคุม อย่างไรก็ตาม ตัวควบคุมแบบคงทนที่ออกแบบโดยวิธีนี้มักจะมีลำดับสูงและมีโครงสร้างซับซ้อน ทำให้การนำตัวควบคุมมาใช้งานจริงมีน้อยและเป็นไปได้ยาก เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมแบบคงทนที่กำหนดโครงสร้างได้ด้วยเทคนิคขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithms) สำหรับวงจรทระดับแรงดัน (Boost Converter) แบบโหมดกระแส เทคนิคนำเสนอนี้จะสามารถกำหนดโครงสร้างของตัวควบคุมได้ โดยในบทความนี้กำหนดเป็นแบบพีโอดี วิธีขั้นตอนเชิงพันธุกรรม จะใช้ในการหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมนั้น โดยหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนจากตัวรบกวนไปยังเอาต์พุตมีค่าต่ำที่สุด ซึ่งวิธีการนี้อาศัยส่วนหนึ่งจากเทคนิคการจัดสรรฐานวงรอบเอชอินฟินิตี (H infinity Loop Shaping) ตัวควบคุมที่ออกแบบโดยเทคนิคที่นำเสนอนี้จะมีสมรรถนะและความคงทนสูงและมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ในบทความนี้ได้ทดลองกับวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ขนาด 300 W ควบคุมแบบโหมดกระแสแบบเฉลี่ย จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมที่ออกแบบขึ้นมีความคงทนต่อตัวรบกวนและการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ในระบบ ผลจากการจำลองการทำงานบนคอมพิวเตอร์ยืนยันและแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของเทคนิคที่นำเสนอ

คำสำคัญ: วงจรทระดับแรงดัน การควบคุมแบบเอชอินฟินิตี การควบคุมแบบคงทน วิธีขั้นตอนเชิงพันธุกรรม

Abstract-- H_∞ control is the one of popular techniques for controlling system. However, robust controller designed by conventional H infinity control results in high order and complicated structure. It is not easy to implement this controller in practical work. To overcome this problem, we propose a genetic algorithm based fixed-structure H infinity loop shaping control to design a robust controller for a current mode boost converter. The infinity norm of the transfer function from disturbance to output is subjected to be minimized using genetic algorithm. Simple structure and robust controller can be achieved by the proposed technique. In this paper, the designed controller is implemented on an average current mode control of 300W boost converter. Robustness against parameters changing and disturbance is clearly shown in experimental results. Simulation results are also shown for comparison and prove the effectiveness of our technique.

Keywords: Boost Converter, H infinity Control, Robust Control, Genetic Algorithms

1. บทนำ

วงจรทระดับแรงดัน (Boost Converter) เป็นวงจรที่มีความสำคัญอย่างมากในทางอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังหลายชนิด อาทิเช่น เครื่องอัดประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่ ตัวควบคุมจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงโซลาร์เซลล์ และแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบสวิตชิง เป็นต้น ในอดีตมีงานวิจัยเกี่ยวกับวงจรทระดับแรงดันและวงจรแปลงผันกระแสตรงเป็นกระแสตรงอย่างแพร่หลาย อาทิเช่น งานวิจัยที่แสดงอยู่ใน [1-7] Simone Buso [1] ได้นำเสนอการควบคุมแบบคงทนที่ใช้

*Corresponding Author

หลักการ μ -synthesis ในออกแบบระบบควบคุมแรงดันของวงจรทอนทระดับแรงดัน (Buck-Boost Converter) แบบโหมดกระแส การควบคุมแบบนี้สามารถจำกัดกระแสทางด้านอินพุตและป้องกันการผิดพลาดในการสวิทช์ได้ M. Ahmed [2] ได้นำเสนอแบบจำลองของคอนเวอร์เตอร์แบบต่างๆ และวิเคราะห์หาตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยคำนึงถึงสมรรถนะของระบบ ในบทความ[2] ได้มีการทดลองกับวงจรทอนระดับแรงดัน (Buck Converter) ในบทความ[3] ได้นำเสนอการควบคุมแบบ Sliding mode สำหรับควบคุมวงจรคอนเวอร์เตอร์ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมแบบนี้สามารถควบคุมระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพและความคงทนสูง บทความ[4] แสดงผลการเปรียบเทียบตัวควบคุมแบบ Sliding mode และตัวควบคุมแบบพีไอดี จากบทความนี้จะเห็นข้อดีข้อเสียและข้อจำกัดของการใช้งานการควบคุมพีไอดีและ sliding mode

การควบคุมแบบคงทน (Robust Control) ได้ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิจัยในระบบควบคุมต่างๆรวมทั้งในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง (DC-DC Converter) การควบคุมแบบ Sliding mode ในบทความ[5] ก็นับว่าเป็นตัวควบคุมแบบคงทนประเภทหนึ่ง ในบทความ[6] ได้นำเสนอตัวควบคุมคงทนชนิดเชิงเส้นกับวงจรคอนเวอร์เตอร์ การออกแบบตัวควบคุมนี้จะคำนึงถึงค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงของระบบโดยตัวควบคุมสามารถควบคุมให้ระบบมีเสถียรภาพและสมรรถนะสูงแม้ว่าจะมีตัวรบกวนหรือพารามิเตอร์ของระบบเปลี่ยนแปลงไปก็ตาม ในบทความ [7] มีการนำเสนอการใช้ตัวควบคุมแบบคงทนโดยหลักการของ Passivity สำหรับควบคุมวงจรทอนระดับแรงดัน

สำหรับการควบคุมแบบคงทนนั้น เทคนิคการควบคุมแบบเอชอินฟินิตี้เป็นที่นิยมในการออกแบบอย่างแพร่หลาย ซึ่งเทคนิคนี้จะรับประกันความคงทน (Robustness) และสมรรถนะ (performance) ที่ดีของระบบได้ แต่โครงสร้างของตัวควบคุมที่ออกแบบโดยวิธีนี้มักจะมีโครงสร้างที่ซับซ้อนและมีลำดับสูง ทำให้มีการนำไปใช้จริงได้ยาก เพื่อแก้ปัญหานี้ สมยศและมณิก [8] ได้เสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมแบบคงทนที่กำหนดโครงสร้างได้ โดยอาศัยเทคนิคการจัดสถานะวงรอบเอชอินฟินิตี้ และวิธีขั้นตอนเชิงพันธุกรรม ทำให้ได้ตัวควบคุมที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน มีความคงทนระบบสูงและมีสมรรถนะ

ที่ดี บทความนี้จะประยุกต์ใช้วิธีการนี้ในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับวงจรทอนระดับแรงดันแบบโหมดกระแส

ในวงจรทอนระดับแรงดันสามารถแบ่งลักษณะการควบคุมแรงดันทางด้านเอาต์พุตได้เป็น 2 แบบ คือ การควบคุมแบบโหมดแรงดันและแบบโหมดกระแส สำหรับการควบคุมแบบโหมดกระแสจะมีข้อดีมากกว่าแบบโหมดแรงดัน กล่าวคือสามารถจำกัดกระแสทางด้านอินพุต ป้องกันความผิดพลาดในการสวิทช์และเพิ่มความเร็วในการตอบสนองของระบบได้ดีขึ้น ดังนั้น การควบคุมแบบโหมดกระแสจึงเป็นที่นิยม การควบคุมแบบโหมดกระแสจะมีวงรอบการควบคุมอยู่ 2 วงรอบ คือ วงรอบในสำหรับควบคุมกระแส (Inner Current-Loop) และวงรอบนอกสำหรับควบคุมแรงดัน (Outer Voltage-Loop) ในงานวิจัยนี้จะออกแบบตัวควบคุมวงรอบกระแสโดยใช้เทคนิคที่นำเสนอใน [9-10] เพื่อให้ระบบมีความไวมากขึ้น ระบบควบคุมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จะใช้กับตัวควบคุมวงรอบแรงดัน เพื่อให้ระบบรวมมีความคงทน

2. แบบจำลองและค่าพารามิเตอร์ของระบบ

จากที่กล่าวมาข้างต้น การออกแบบตัวควบคุมสำหรับวงจรทอนระดับแรงดันในงานวิจัยนี้ สามารถออกแบบได้ดังนี้

2.1 การออกแบบตัวควบคุมกระแสวงรอบใน

ตัวควบคุมวงรอบกระแสจะควบคุมระดับของกระแสทางด้านอินพุตให้เท่ากับกระแสอ้างอิง โดยกระแสอ้างอิงนี้มาจากเอาต์พุตของตัวควบคุมวงรอบนอกซึ่งทำหน้าที่ควบคุมแรงดันทางด้านเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ตามคำสั่งของผู้ใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 1 การควบคุมแบบโหมดกระแสที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีสองแบบ คือ แบบควบคุมกระแสสูงสุด (Peak Current Mode Control : PCMC) และแบบควบคุมกระแสเฉลี่ย (Average Current Mode Control : ACMC) การควบคุมแบบควบคุมกระแสเฉลี่ยจะมีข้อดีมากกว่าแบบควบคุมกระแสสูงสุด คือ สามารถกำจัดสัญญาณรบกวนที่ทำให้เกิดการสวิทช์ผิดพลาดได้ ดังนั้น ในบทความนี้ จะนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมสำหรับคอนเวอร์เตอร์แบบ ACMC

การออกแบบตัวควบคุมในวงรอบกระแสนี้ อาจใช้ตัวควบคุมแบบพีไอได้ เทคนิคการออกแบบตัวควบคุมที่นำเสนอใน [9-10] จะถูกนำมาใช้และนำเสนอในหัวข้อนี้โดยสังเขป กำหนดให้ตัวควบคุมแบบพีไอที่ใช้ คือ

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

$$\text{เมื่อ } K_c = \frac{1}{R_f(C_{fp} + C_{fs})}, \omega_z = \frac{1}{R_f C_{fs}}, \omega_p = \frac{C_{fs} + C_{fp}}{R_f C_{fs} C_{fp}}$$

โดยที่ค่า G_{CA} สามารถประมาณค่าได้เป็น R_f/R_i ที่ตำแหน่งความถี่ในการสวิทช์ [9] ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$G_{CA} \approx \frac{R_f}{R_i} < \min\left\{\frac{2V_m f_s L}{V_g R_s}, \frac{V_m f_s L}{V_o R_s}\right\} \quad (2)$$

เมื่อ V_m คือ ความแรงดันขด-ขดของสัญญาณรูปสามเหลี่ยม (สัญญาณแคเรียร์) ในวงจร (ดูรูปที่ 1)

R_s คือ ค่าความต้านทานสำหรับตัวตรวจจับสนะ

V_g คือ แรงดันทางด้านอินพุต

R_f, R_i, L คือ ตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำในวงจรดังแสดงในรูปที่ 1

สมการที่ (1) และ (2) สามารถใช้เป็นเงื่อนไขในการเลือกค่า R_f และ R_i ได้ จาก [9-10] ค่า ω_z จะถูกออกแบบให้มีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของ ω_o เมื่อ $\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ และ ω_p จะถูกออกแบบให้มีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของความถี่ในการสวิทช์ (f_s) จากการออกแบบข้างต้นจะสามารถออกแบบค่าอุปกรณ์ในตัวควบคุมกระแสวงรอบในได้ เมื่อออกแบบวงรอบกระแสแล้วสามารถพิจารณาได้ว่า ตัวควบคุมกระแสวงรอบในกับตัวคอนเวอร์เตอร์นั้นรวมกันเป็นระบบที่จะต้องถูกควบคุมโดยตัวควบคุมแรงดันวงรอบนอก สมมติให้ $G_{vc}(s)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนจากกระแสอ้างอิงไปยังแรงดันเอาต์พุต ค่าฟังก์ชันถ่ายโอนสามารถแสดงได้ดังนี้ [9]

$$G_{vc} = \frac{v_o}{v_c} = \frac{F_m G_{CA}(s) G_{vd}(s)}{1 + R_f F_m H_c(s) G_s(s) G_{id}(s) - K_r F_m G_{vd}(s)} \quad (3)$$

เมื่อ K_r คือ ค่าอัตราขยายของสัญญาณป้อนกลับ

$$G_s(s) = \frac{K_c(1 + \frac{s}{\omega_z})}{s}, G_{vd} \text{ และ } G_{id} \text{ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนจาก}$$

ค่าคิวตี้ไซเคิลไปยังแรงดันเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ และฟังก์ชันถ่ายโอนจากค่าคิวตี้ไซเคิลไปยังกระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำ L ตามลำดับ $v_c(t), v_o(t)$ คือ เอาต์พุตจากวงรอบควบคุมแรงดัน (ในที่นี้เรียกว่ากระแสอ้างอิง) และแรงดันเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ ตามลำดับ

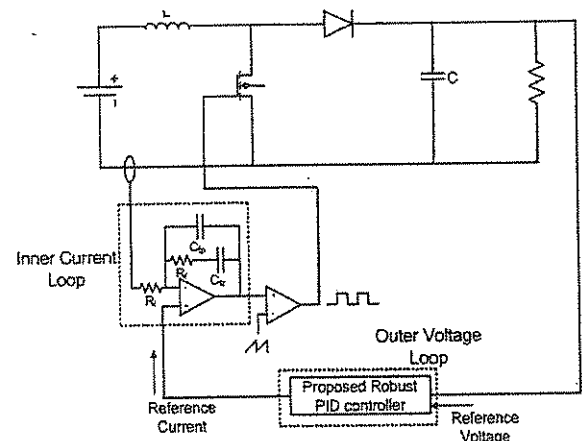
วงจรทระดับแรงดันที่ใช้ทดลองในบทความนี้มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

$$R_s = 0.14 \Omega, L = 90 \text{ mH}, C = 470 \mu\text{F}, f_s = 139 \text{ kHz}, R = 10 \Omega,$$

$$V_g = 12 \text{ V}, V_m = 4.5 \text{ V}, V_o = 17 \text{ V}$$

จากวิธีการออกแบบดังกล่าวข้างต้น สามารถออกแบบตัวควบคุมกระแสวงรอบใน โดยเทคนิคนี้ [9-10] ได้เป็น

$$R_f = 5 \text{ k}\Omega, R_i = 1 \text{ k}\Omega, C_{fp} = 100 \text{ nF}, C_{fs} = 3 \text{ nF}$$



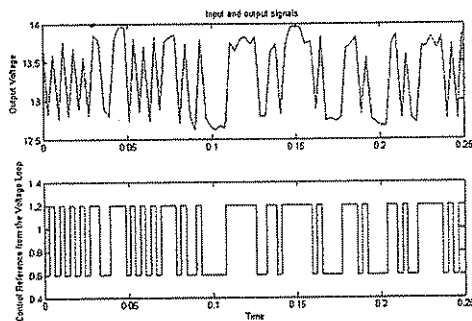
รูปที่ 1 แสดงภาพของวงจรทระดับแรงดันแบบใหม่กระแส

2.2 การหาค่าฟังก์ชันถ่ายโอน G_{vc}

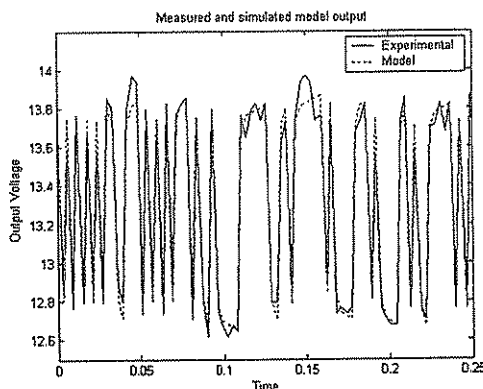
ในบทความนี้จะหาค่าฟังก์ชันถ่ายโอน G_{vc} ซึ่งเป็นระบบที่ต้องการควบคุมของวงจรทระดับแรงดันที่รวมตัวควบคุมวงรอบกระแสแล้ว งานวิจัยนี้ทำการหาค่าพารามิเตอร์ของระบบ (System Identification) โดยวิธีการป้อนสัญญาณและหาค่าโมเดลแบบกล่องดำ (Black-Box Modeling) [11] ซึ่งเป็นวิธีที่สมมติให้ไม่รู้ค่าพารามิเตอร์และ โครงสร้างของระบบ โครงสร้างแบบจำลองที่ใช้ในบทความนี้จะใช้โครงสร้างแบบจำลองมาตรฐานเออาร์แม็กซ์ (ARMAX) สำหรับฟังก์ชันถ่ายโอน G_{vc} มีอินพุต คือ กระแสอ้างอิงและมีเอาต์พุต คือ แรงดันทางด้านเอาต์พุตของวงจรทระดับแรงดัน ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดจะทำการป้อนสัญญาณอินพุตที่เหมาะสมและเก็บค่าเอาต์พุตที่ได้เพื่อนำไปใช้หาค่าพารามิเตอร์และ โครงสร้างของระบบที่ทำให้ความคลาดเคลื่อนระหว่างแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดลองมีค่าต่ำที่สุด โครงสร้างแบบจำลองแบบ ARMAX สามารถเขียนเป็นสมการพลวัตของระบบได้ดังนี้

$$y(t) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} u(t) + \frac{C(z^{-1})}{A(z^{-1})} e(t) \quad (4)$$

เมื่อ $B(z^{-1})$, $A(z^{-1})$ และ $C(z^{-1})$ คือ ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่อยู่ในเทอมของ z^{-1} (delay), y คือ เอาต์พุต, u คือ อินพุต, e คือ ค่าความคลาดเคลื่อน และ n_b , n_a , n_c คือ ลำดับ (Order) ของอินพุต เอาต์พุต และ สัญญาณรบกวน ตามลำดับ การหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวสามารถทำได้โดยวิธีมาตรฐาน ซึ่งวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ของ $B(z^{-1})$, $A(z^{-1})$ และ $C(z^{-1})$ สามารถดูรายละเอียดได้จากเอกสารอ้างอิง [11]



(ก)



(ข)

รูปที่ 2 แสดงกราฟการหาค่าพารามิเตอร์ของระบบ (ก) สัญญาณอินพุตและการตอบสนองของเอาต์พุต $v_o(t)$ (ข) กราฟเปรียบเทียบผลการตอบสนองของเอาต์พุตที่อินพุตเดียวกันระหว่างแบบจำลองและข้อมูลการทดลอง

ในบทความนี้จะป้อนสัญญาณ PBRS (Pseudo Binary Random Signal) ของสัญญาณกระแสอ้างอิงเข้าไปในระบบ ซึ่งมีเวลาการสุ่ม (Sampling Time) เท่ากับ 0.001 วินาที และวัดแรงดันทางด้านเอาต์พุต ($v_o(t)$) รูปที่ 2 (ก) แสดงภาพสัญญาณที่ป้อนเข้าไปในระบบ (กระแสอ้างอิง) และผลตอบสนองของแรงดันทางด้านเอาต์พุต จากรูปจะสามารถเห็นผลการ

ตอบสนองของระบบได้อย่างชัดเจนและสามารถนำไปวิเคราะห์หาโมเดลของระบบได้ โครงงานวิจัยนี้นำข้อมูลดังกล่าวไปจำลองหาค่าฟังก์ชันถ่ายโอนจากวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ระบบ[11] โดยใช้โปรแกรม MATLAB System Identification Toolbox จากผลการรันโปรแกรมดังกล่าวได้แบบจำลองของระบบนี้คือ

$$G_m(s) = G_s(s) = \frac{1553s + 14740}{(s^2 + 848s + 1038)} \quad (5)$$

รูปที่ 2 (ข) แสดงให้เห็นผลการตรวจสอบความถูกต้องระหว่างแบบจำลองที่ได้กับข้อมูลจากการทดลองในระบบจริง

3. การออกแบบตัวควบคุมแบบคงทนที่กำหนดโครงสร้างได้โดยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

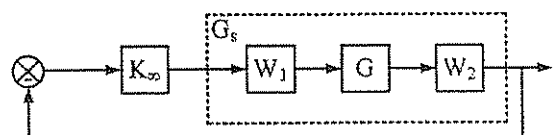
หัวข้อนี้จะอธิบายเทคนิคการออกแบบแบบจัดตั้งฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้แบบเดิมที่นำเสนอโดย Glover และ McFarlane [12] ในหัวข้อที่ 3.1 และในหัวข้อที่ 3.2 จะนำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมแบบจัดตั้งฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้ (H infinity Loop Shaping) ที่กำหนดโครงสร้างได้โดยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่ใช้ออกแบบในบทความนี้

3.1 การออกแบบตัวควบคุมแบบจัดตั้งฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้

ตัวควบคุมแบบคงทนด้วยเทคนิคจัดตั้งฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้นี้เสนอครั้งแรกโดย Glover และ McFarlane [12] การออกแบบตัวควบคุมแบบนี้จะสามารถรับประกันความคงทนของระบบได้ โดยพิจารณาเป็นแบบโคพรา임แฟกเตอร์ (Coprime Factor) ขั้นตอนแรกของการออกแบบตัวควบคุมจะต้องทำการจัดตั้งฐานของระบบที่จะถูกควบคุม G โดยใช้ฟังก์ชันนำหน้าชดเชยก่อน (pre-compensation) W_1 และ/หรือฟังก์ชันนำหน้าชดเชยหลัง (post-compensation) W_2 ระบบที่มีการจัดตั้งฐานแล้วจะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$G_s = W_1 G W_2 \Rightarrow \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$$

เมื่อ A , B , C และ D คือ ค่าเมตริกสเปซปริภูมิสถานะ (state-space) ของระบบที่มีการจัดตั้งฐานแล้ว



รูปที่ 3 แสดงการจัดตั้งฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้

ค่าฟังก์ชันน้ำหนักชดเชยนี้ใช้เพื่อกำหนดทางสมรรถนะที่ต้องการ โดยสามารถพิจารณาเลือกได้จากเทคนิคการจัดสัดส่วนวงรอบ(Loop Shaping)ทั่วไป กล่าวโดยสังเขป ขั้นตอนในการออกแบบตัวควบคุมแบบจัดสัดส่วนวงรอบเฮออินฟินิตี้ จะมีขั้นตอนในการออกแบบดังนี้

1. จัดสัดส่วนซิงกูลาร์ (singular) ของ nominal plant G ด้วยฟังก์ชันน้ำหนักชดเชยก่อน (pre-compensation) W_1 เพื่อให้ได้ข้อกำหนดทางสมรรถนะและลดผลของตัวรบกวน (disturbance) และกำหนดฟังก์ชันน้ำหนักชดเชยหลัง (post-compensation) W_2 เพื่อลดผลสัญญาณรบกวนของตัวตรวจจับสัญญาณ (sensor) ปกติแล้วฟังก์ชัน W_1 อาจจะเลือกให้เป็นฟังก์ชันอินทิเกรตเพื่อให้ค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว (steady state error) มีค่าเป็นศูนย์ และฟังก์ชัน W_2 อาจกำหนดเป็นค่าเมตริกซ์เอกลักษณะได้ หากสมมติให้สัญญาณรบกวนที่มาจากตัวตรวจจับสัญญาณมีค่าน้อย ในบทความนี้กำหนดให้

$$W_1 = K_w \frac{s + \alpha}{s + \delta}, W_2 = I \quad (6)$$

เมื่อ K_w และ α เป็นค่าคงที่บวกและค่า δ จะเป็นค่าบวกที่มีค่าน้อยมาก เพื่อให้เป็นฟังก์ชันชดเชยเป็นแบบอินทิเกรต

2. หาค่านอร์มอนันต์ที่ต่ำที่สุดที่เป็นไปได้ที่จะมีตัวควบคุม K อย่างน้อย 1 ตัวควบคุมให้ระบบมีค่านอร์มอนันต์ต่ำสุดนั้นได้ เรียกค่านี้นว่า γ_{opt}

$$\gamma_{opt} = \varepsilon_{opt}^{-1} = \inf_{stab K} \left\| \begin{bmatrix} I \\ K \end{bmatrix} (I + G_s K)^{-1} M_s^{-1} \right\|_{\infty} \quad (7)$$

เมื่อ $G_s = W_2 G W_1$ และ M_s คือ normalized denominator coprime factor [14] หากค่า γ_{opt} นี้มีค่ามากกว่า 4 หมายถึง ค่าฟังก์ชันน้ำหนักที่ออกแบบในข้อ 1 ไม่เหมาะสม จะต้องทำการออกแบบค่าฟังก์ชันน้ำหนักในข้อ 1 ใหม่

3. เลือกค่า $\varepsilon < \varepsilon_{opt}$ และสร้างชุดควบคุม K_{∞} โดยแก้สมการต่อไปนี้

$$\|T_{zw}\|_{\infty} = \left\| \begin{bmatrix} I \\ K \end{bmatrix} (I + G_s K)^{-1} M_s^{-1} \right\|_{\infty} \leq \varepsilon^{-1} \quad (8)$$

ตัวควบคุม K_{∞} สามารถหาได้จากการออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุดในสมการที่ (8) รายละเอียดของการแก้สมการหาตัวควบคุมดังกล่าว อยู่ในเอกสารอ้างอิง [13]

4. เมื่อได้ตัวควบคุมในข้อที่ 3 แล้วจะสามารถหาตัวควบคุม K ที่นำไปใช้งานได้จาก

$$K = W_1 K_{\infty} W_2 \quad (9)$$

3.2 การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุมแบบจัดสัดส่วนวงรอบเฮออินฟินิตี้ (H infinity Loop Shaping) ที่กำหนดโครงสร้างได้ด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

วิธีการในหัวข้อนี้ นำเสนอครั้งแรกโดย สมยศและมนูกิจ [8] ในบทความนี้จะนำเสนอวิธีการสังเคราะห์ตัวควบคุมที่กำหนดโครงสร้างได้โดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมประยุกต์ใช้กับวงจรทระดับแรงดันไฟฟ้า กำหนดให้ตัวควบคุมที่ต้องการออกแบบมีโครงสร้างเป็น $K(p)$ พารามิเตอร์ p คือ ตัวแปรที่ต้องการหาที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ระบบควบคุมมีค่านอร์มอนันต์ของ $\|T_{zw}\|_{\infty}$ ต่ำที่สุด จากสมการที่ (9) K_{∞} สามารถเขียนได้เป็น

$$K_{\infty} W_2 = W_1^{-1} K(p) \quad (10)$$

โดยกำหนดให้ $W_1^{-1} \in \mathcal{RH}_{\infty}$ หากเลือกค่า $W_2 = I$ (ไม่คิดผลของสัญญาณรบกวนจากตัวตรวจจับ) ดังนั้น

$$K_{\infty} = W_1^{-1} K(p) \quad (11)$$

แทนค่าสมการที่ (11) ลงในสมการที่ (8) จะได้ค่า $\|T_{zw}\|_{\infty}$ ดังสมการที่ (12) ดังนั้นในบทความนี้กำหนดให้ค่า $\|T_{zw}\|_{\infty}$ คือ ค่าฟังก์ชัน J_{cost} ที่ต้องการให้มีค่าต่ำที่สุดโดยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ส่วนกลับของค่านี้จะบอกถึงความคงทนและความสอดคล้องกับระบบที่มีการจัดสัดส่วนที่กำหนดไว้

$$J_{cost} = \gamma = \|T_{zw}\|_{\infty} = \left\| \begin{bmatrix} I \\ W_1^{-1} K(p) \end{bmatrix} (I + G_s W_1^{-1} K(p))^{-1} M_s^{-1} \right\|_{\infty} \quad (12)$$

สรุปขั้นตอนการออกแบบโดยวิธีนี้ได้ดังต่อไปนี้

1. ทำการออกแบบค่าฟังก์ชันน้ำหนักชดเชยก่อน (W_1) และหลัง (W_2) แทนค่าลงในสมการที่ (7) โดยจะต้องออกแบบให้มีค่า $\gamma_{opt} > 4$ (หรือ $\varepsilon_{opt} < 0.25$) ถ้าหากค่านี้เกินค่าที่กำหนดแสดงว่าฟังก์ชันน้ำหนัก W_1 และ W_2 ที่ออกแบบไว้ไม่เหมาะสมให้ทำการปรับฟังก์ชันเหล่านี้ใหม่

2. กำหนดโครงสร้างของชุดควบคุม $K(p)$ และทำการสุ่มค่าเริ่มต้นของประชากร p ในรุ่น (Generation) ที่ 1 และกำหนดค่าพารามิเตอร์ของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

3. คำนวณค่าฟังก์ชัน J_{cost} ของแต่ละสมาชิกในประชากรรุ่นที่ 1 โดยใช้สมการที่ (12) กำหนดให้ค่า J_{cost} เป็นค่าเลขจำนวนมากหากระบบไม่มีเสถียรภาพโดยตัวควบคุม (ตรวจสอบได้

จากโพลของระบบวงรอบปิดว่ามีค่าบวกหรือไม่) กำหนดให้ค่าฟังก์ชันฟิตเนส (Fitness Function) มีค่าเท่ากับส่วนกลับของ J_{cost} นั่นคือ ฟิตเนส เท่ากับ $1/J_{cost}$ และเลือกประชากรตัวที่ทำให้ค่าฟิตเนสสูงสุด (J_{cost} มีค่าต่ำที่สุด) มาเป็นคำตอบในรอบนี้

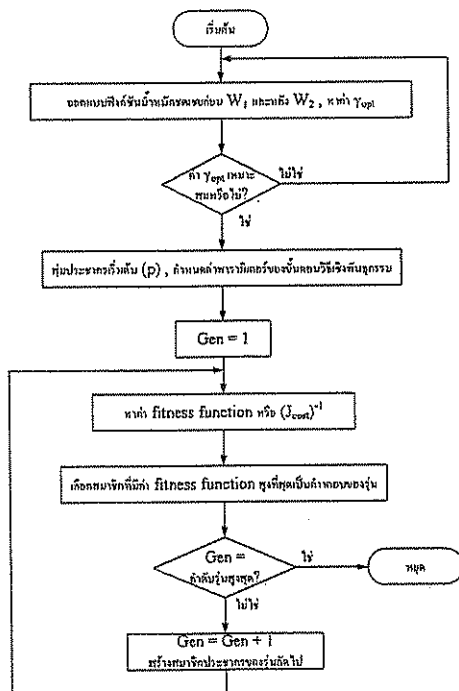
4. เพิ่มรุ่นไป 1 รุ่น

5. สร้างสมาชิกของประชากรในรอบใหม่จากวิธีการทางพันธุกรรม ซึ่งได้แก่ การผสมข้ามสายพันธุ์ (Cross Over) การกลายพันธุ์ (Mutation) และการสำเนาพันธุ์ (Reproduction) แล้วเริ่มขั้นตอนที่ 3 ใหม่อีกครั้งจนกระทั่งถึงลำดับรุ่นสูงสุดที่เราต้องการ สำหรับวิธีการทางพันธุกรรมรายละเอียดได้ที่ [8]

6. ทำการตรวจสอบสมรรถนะของระบบทั้งในโดเมนความถี่และโดเมนเวลา ถ้าสมรรถนะระบบยังไม่เหมาะสมให้เริ่มต้นขั้นตอนที่ 1 ใหม่อีกครั้ง รูปที่ 4 แสดงถึงแผนผังการออกแบบตัวควบคุมแบบจัดตั้งฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้ที่กำหนดโครงสร้างโดยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

4. การออกแบบการควบคุมและผลการทดลอง

ตัวควบคุมแบบคงทน ในบทความนี้จะออกแบบในวงรอบนอก (ตัวควบคุมแรงดัน) ของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบโหมดกระแส



รูปที่ 4 แผนผังการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมสำหรับออกแบบตัวควบคุมแบบคงทน [8]

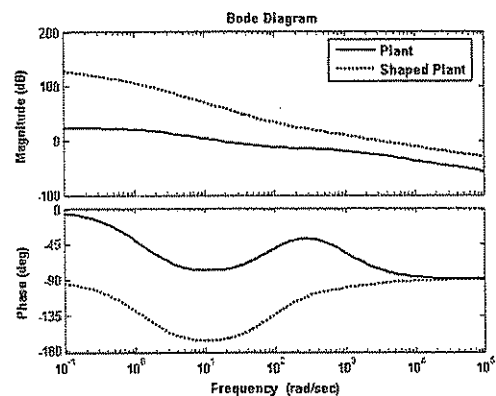
4.1 การออกแบบตัวควบคุมแรงดันวงรอบนอก

การออกแบบตัวควบคุมกระแสวงรอบในจะออกแบบตามเทคนิคที่ได้แสดงในหัวข้อที่ 2 จากการหาค่าแบบจำลองทางพลวัตของระบบ ด้วยวิธีการมาตรฐานจะได้ระบบตามสมการที่ (5) ซึ่งสามารถพล็อตแผนภาพโบดได้ดังรูปที่ 5 ตามเส้นทึบ จากรูปจะเห็นได้ว่าระบบที่ยังไม่จัดตั้งฐาน ในช่วงความถี่ต่ำจะมีค่าอัตราขยายต่ำและมีแบนวิทของระบบไม่มากประมาณ 20 rad/s ซึ่งจะมีผลตอบสนองของระบบได้ในย่านความถี่แคบๆ เท่านั้น ในการออกแบบระบบให้มีสมรรถนะที่ดีจะทำการจัดตั้งฐานของระบบด้วยฟังก์ชันน้ำหนักขดเชยก่อน W_1 และฟังก์ชันน้ำหนักขดเชยหลัง W_2 ในบทความนี้เลือก

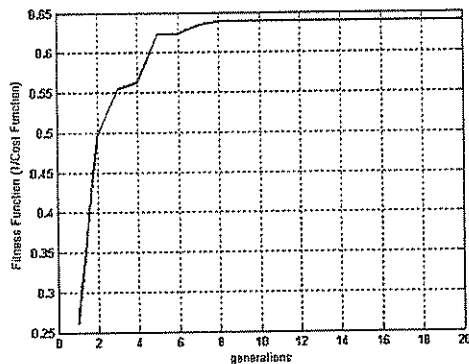
$$W_1 = \frac{20s + 2000}{s + 0.001}, W_2 = 1 \quad (13)$$

เมื่อมีการจัดตั้งฐานแล้วพิจารณาจากกราฟในรูปที่ 5 ตามเส้นประ พบว่า ค่าแบนวิทของระบบจะเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 2000 rad/s และมีค่าอัตราขยายในช่วงความถี่ต่ำสูง ซึ่งหมายถึงสมรรถนะและความคงทนต่อตัวรบกวนของระบบดีขึ้น

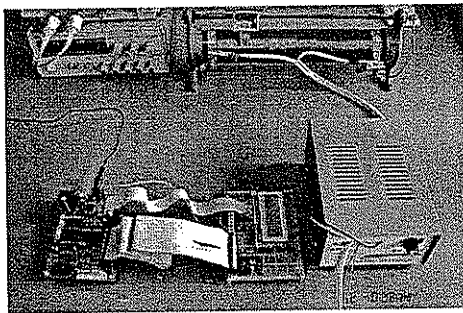
ในงานวิจัยนี้เลือกใช้โครงสร้างตัวควบคุมแบบพีไอดี ซึ่งโครงสร้างของตัวควบคุมนี้มีลักษณะดังสมการที่ (12) การออกแบบจะใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการหาค่าพารามิเตอร์ K_p , K_i และ K_d ที่เหมาะสมที่ทำให้ fitness function สูงที่สุด



รูปที่ 5 แสดงแผนภาพโบดของระบบและระบบที่มีการจัดตั้งฐานแล้ว



รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง fitness function และลำดับรุ่นของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม



รูปที่ 7 แสดงภาพวงจรทระดับแรงดันแบบโหมคระเสขนาด 300 W

$$K(p) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d s}{\tau_d s + 1} \quad (14)$$

เมื่อ τ_d คือ ค่าพารามิเตอร์ของตัวกรองอันดับที่หนึ่ง (first order filter) โดยจะเลือกให้เหมาะสมกับแบนด์วิดท์ของระบบที่จะควบคุม ในที่นี้กำหนดให้ $\tau_d = 0.001$ จากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังนี้ ขนาดของประชากรเท่ากับ 1000 ค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิด crossover = 0.6 ค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิด mutation = 0.05 และจำนวนลำดับรุ่นสูงสุดเท่ากับ 40 ค่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่หาได้แสดงในสมการที่ (15) ซึ่งตัวควบคุมนี้ทำให้ระบบมีส่วนเพื่อเสถียรภาพ (ξ) เท่ากับ 0.6433

$$K(p) = 20.8 + \frac{1970}{s} + 0.0003s \quad (15)$$

รูปที่ 6 แสดงผลของการใส่ค่าของคำตอบ จากรูปจะเห็นว่าคำตอบจะเข้าสู่ตั้งแต่รุ่นที่ 8

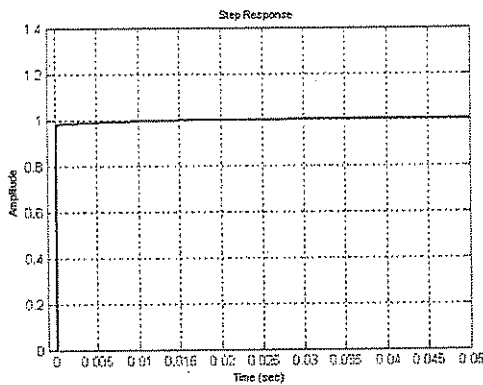
4.2 ผลจากการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์และผลการทดลองจริง

ในรูปที่ 7 แสดงภาพวงจรทระดับแรงดันแบบโหมคระเสขนาด 300W ที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ ผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ของตัวควบคุมในสมการที่ (15) กับระบบนี้แสดงดังรูปที่ 8 (ก) ส่วนผลการทดลองของระบบที่ออกแบบโดยวิธีที่นำเสนอจะแสดงในรูปที่ 8(ข) จากรูปจะเห็นว่าผลการที่ได้จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์และผลการทดลองจริงนั้นสอดคล้องกัน โดยมีลักษณะผลตอบสนองแบบหน่วงเกิน (over damp) และมีค่าเวลาขึ้น (rise time) ใกล้เคียงกันประมาณ 3-4 ms เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองและการออกแบบแบบเดิม ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบตัวควบคุมแบบจัดฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้ใน [12] จากการออกแบบพบว่า ตัวควบคุมที่มีข้อกำหนดทางฟังก์ชันน้ำหนักเดียวกันและมีค่าส่วนเพื่อเสถียรภาพเท่ากับ 0.660 ของการควบคุมแบบนี้เป็น

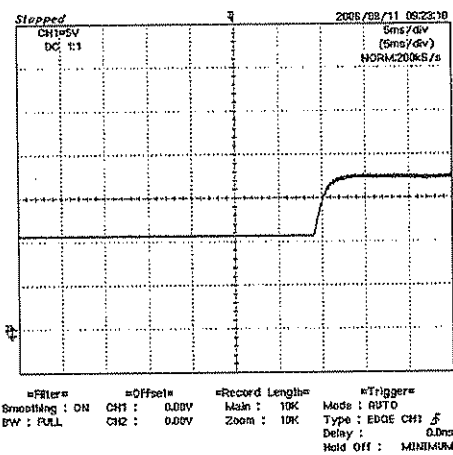
$$K = \frac{(20s+2000)}{(s+0.001)} \times \frac{(5.24 \times 10^4)(s+105.36)(s+9.44)}{(s+8.48 \times 10^4)(s+0.01 \times 10^4)(s+0.0009 \times 10^4)} \quad (16)$$

ผลการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ด้วยผลตอบสนองต่อฟังก์ชันขั้นบันได (Step Function) แสดงในรูปที่ 9 จากรูปจะเห็นว่า วิธีการที่ออกแบบนั้นได้ผลตอบสนองที่ใกล้เคียงกับการออกแบบแบบเดิม โดยมีส่วนเพื่อเสถียรภาพใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม พิจารณาจากตัวควบคุมในสมการที่ (14) และ (16) พบว่า โครงสร้างของตัวควบคุมที่นำเสนอจะมีโครงสร้างง่ายกว่า

เพื่อทดสอบคุณสมบัติความคงทนของระบบต่อพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลง งานวิจัยนี้ได้ทำการเปลี่ยนโหลดของระบบจาก 10Ω เป็น 50Ω จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ระบบที่ออกแบบมีความคงทนต่อพารามิเตอร์ของระบบที่เปลี่ยนไป ดังแสดงในรูปที่ 10



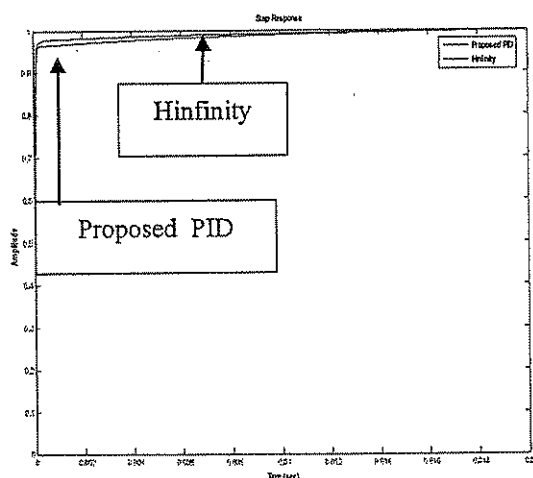
(ก)



(ข)

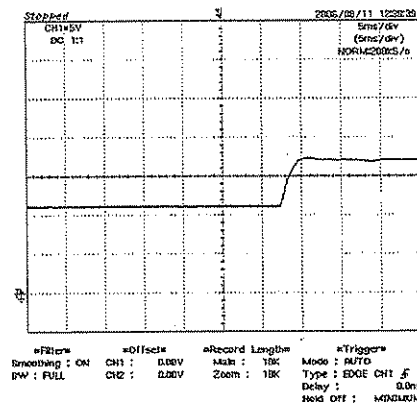
รูปที่ 8 แสดงภาพการตอบสนองฟังก์ชันขั้นบันได

(ก) ผลจากแบบจำลองที่ได้จากคอมพิวเตอร์ (ข) ผลจากการทดลองจริง

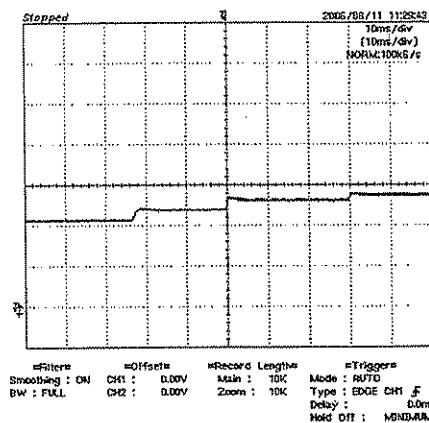


รูปที่ 9 แสดงผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบจัดถ่วงฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้และตัวควบคุมแบบที่นำเสนอ

เมื่อมีโหลดเปลี่ยนแปลง ณ ตำแหน่งเวลาประมาณ 10 ms นับจากจุดที่เริ่มเกิดผลตอบสนอง เอาท์พุทจะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยและระบบจะสามารถควบคุมแรงดันเอาท์พุท



รูปที่ 10 แสดงภาพการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 11 แสดงภาพการตอบสนองของระบบเมื่อแรงดันอ้างอิงเปลี่ยนเป็นค่าต่างๆ

รูปที่ 11 แสดงผลการตอบสนองฟังก์ชันขั้นบันไดในกรณีที่ มีจุดทำงานหรือจุดที่จะควบคุมที่เปลี่ยนไปจากเดิม อาทิเช่น ต้องการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทที่นอกเหนือจากที่ทำการออกแบบไว้ จากรูปจะเห็นได้ว่า ผลตอบสนองยังคงมีเสถียรภาพอยู่และมีสมรรถนะใกล้เคียงเดิมแม้ว่าจุดทำงานจะเปลี่ยนไป

5. สรุป

ตัวควบคุมที่ออกแบบขึ้นโดยวิธีที่นำเสนอนี้สามารถทำให้ระบบมีสมรรถนะความคงทนสูง ด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมทำให้การออกแบบชุดควบคุมที่กำหนดโครงสร้างได้ทำได้ง่ายขึ้น โดยอาศัยหลักการจัดถ่วงฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้ (H infinity) ซึ่งมีดัชนีที่ใช้วัดความคงทนและสมรรถนะคือ

ส่วนเพื่อเสถียรภาพ (E) จากการออกแบบหาคะควบคุมในบทความนี้มีค่าเพื่อเสถียรภาพเท่ากับ 0.6433 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมที่ออกแบบขึ้นนี้สอดคล้องกับข้อกำหนดทางสมรรถนะและความคงทนที่ต้องการ จากผลการทดลองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าน้ำอิงและมีการเปลี่ยนแปลงโพลของระบบ ระบบให้ผลตอบสนองที่ดีและใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้ กล่าวโดยสรุป วิธีการออกแบบตัวควบคุมที่นำเสนอนี้สามารถออกแบบหาคะควบคุมที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการนำไปใช้งานจริง และมีสมรรถนะและความคงทนสูง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Simone Buso, "Design of a Robust Voltage Controller for a Buck-Boost Converter Using γ -Synthesis", *IEEE Trans. On Control Systems Technology*, Vol. 7, No. 2, pp. 222-229, March 1999.
- [2] M. Ahmed, M. Kuisma, P. Silventoinen, "Standard Procedure for Modeling the Basic Three Converters (Buck, Boost, and Buck-boost) With PID Algorithm Applied", *XIII-th International Symposium on Electrical Apparatus and technologies*, Vol.1, pp 9-14, May 2003.
- [3] M. Ahmed, M. Kuisma, P. Silventoinen, "Implementing Simple Procedure for Controlling Switch Mode Power Supply Using Sliding Mode Control as a Control Technique", *XIII-th International Symposium on Electrical Apparatus and technologies Siela*, Vol.1, pp 9-14, May 2003.
- [4] M. Ahmed, M. Kuisma, P. Silventoinen., "Comparison between PID Control and Sliding Mode Control for Buck Converter", *Proceedings of the Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. SPEEDAM 2004*, CAPRI - ITALY, 16-18 June, 2004.
- [5] Cortes, D., Alvarez, J. 2002. "Robust sliding mode control for the boost converter". *Proceedings of VIII IEEE International Power Electronics Congress*, (CIEP 2002), 20-24 Oct. 2002 pp: 208 - 212.
- [6] T. B. Petrovi and Raki, "Linear robust approach to DC/DC converter modeling—I: Deterministic switching", *Electrical Engineering*, Springer Berlin / Heidelberg Vol. 86, No. 5, pp. 267 - 273, September 2004.
- [7] LAAS N°02490 Passivity-based robust control of a boost converter for large-signal stability, Rapport, October 2002.
- [8] S. Kaitwanidvilai, M. Parnichkun, Genetic Algorithm based Fixed-Structure Robust H infinity Loop Shaping Control of a Pneumatic Servo System, *International Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.16:4, 2004.
- [9] He, D.; Nelms, R.M.; "Average current-mode control for a boost converter using an 8-bit microcontroller" *Industrial Electronics, 2004 IEEE International Symposium on Volume 2*, 4-7 May 2004 Page(s):1185 - 1190 vol. 2
- [10] Cooke, P. "Modeling average current mode control of power converters", *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2000. APEC 2000. Fifteenth Annual IEEE (1)*, 6-10 Feb. 2000.
- [11] Ljung, L. "System Identification: Theory for the User", Prentice-Hall 2nd edition 1999.
- [12] McFarlane, D.C. & K. Glover, A loop shaping design procedure using H_∞ synthesis, *IEEE Trans. On Automatic Control* AC-37 (6):759-769, 1992.
- [13] Sigurd Skogestad, Ian Postlethwaite, "Multivariable Feedback Control Analysis and Design", John Wiley & Son, 1996.
- [14] Kemin Zhou, John C. Doyle, *Essential of Robust Control*, Prentice-Hall, 1998.