

การศึกษาพฤติกรรมสภาวะค่าไม่ต่ำสุดและการควบคุมของระบบถ่ายทดกำลังอุทกสถิตแบบอัตรา ทดแปรผันต่อเนื่อง

A Study of a Non-Minimum Phase Behavior and Control of a Hydrostatic CVT Powertrain

ไฉไล บุญสมบัติ¹, ปิโยรส จิระวัฒนา², ธนา ราษฎร์ภักดี^{1*} และ พงษ์พันธ์ ขยันเยี่ยม^{2*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

² ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

* chailai_boon@hotmail.co.th, เบอร์โทรศัพท์: 0-43202845, เบอร์โทรสาร: 0-43202849

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมสภาวะค่าไม่ต่ำสุดในระบบถ่ายทดกำลังอุทกสถิตแบบอัตราทดแปรผันต่อเนื่อง และการออกแบบตัวควบคุมโดยใช้เทคนิคการเปลี่ยนค่าสัญญาณออกใหม่ ซึ่งพัฒนาขึ้นจากพื้นฐานการควบคุมแบบ output-redefinition method อาศัยหลักการประมาณค่า input-output linearization ใช้ความต่อเนื่องของอนุพันธ์ค่าสัญญาณออก โดยจะไม่พิจารณาเทอมสัญญาณเข้าและเลือกพิจารณาค่าสัญญาณออกที่เวลาเดียวกันกับลำดับของระบบ ซึ่งหลักการนี้จะทำให้ไม่มี zero-dynamics รวมถึงการประยุกต์ใช้กับพื้นฐานการหน่วงเวลาเพื่อขจัดปัญหาความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นกับระบบ จะได้ตัวควบคุมที่เหมาะสมทำให้ระบบมีเสถียรภาพภายใต้ระบบเดิม ซึ่งวิธีที่เสนอทำให้ผลการตอบสนองของสัญญาณออกสามารถติดตามค่าสัญญาณอ้างอิงได้เป็นอย่างดีและ สามารถจัดการกับปัญหาสภาวะค่าไม่ต่ำสุดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำหลัก: สภาวะค่าไม่ต่ำสุด, ค่าสัญญาณออก, ความไม่แน่นอน, เสถียรภาพ

Abstract

The aim of this paper is to study the behavior of non-minimum phase in a CVT transmission power train and controller design. The output-redefinition method is employed to compensation uncertainty condition in controller. Another practical approximation may be, when performing input-output linearization using successive differentiation of the output. By neglect the terms the input and keep differentiating the selected output a number of times equal to the system order. Principles is no Zero-dynamics. And uncertainty compensation technique based on Time Delay Control (TDC) has been developed to eliminate the uncertainty of the system. This approach the optimize of controller can be system is stable provided that the original output. To achieve desired in present the output response can be tracking reference. The result found that the propose technique not only provides a good tracking control but also able to deal with a non-minimum phase behavior of a CVT Power train.

Keywords: non-minimum phase, Output-redefinition, tracking control, input-output linearization

1. บทนำ

กว่าปีที่มีการศึกษาการส่งกำลังแบบอัตราทดแปรผันต่อเนื่องซึ่งการส่งกำลังทางกลนั้นมีหลายรูปแบบทั้งแบบใช้สายพาน แบบใช้เกียร์ แต่ในที่นี้จะศึกษาเกี่ยวกับการส่งกำลังโดยใช้ระบบไฮดรอลิกส์ ซึ่งเป็นอีกรูปแบบหนึ่งของ CVT เรียกว่าระบบถ่ายทอดกำลังอุทกสถิต (Hydrostatic transmission) โดยมีหลักการและวัตถุประสงค์ของการถ่ายทอดกำลังเพื่อทดขนาดของแรงบิดหรือความเร็วที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อนส่วนประกอบที่สำคัญในระบบนี้คือ เครื่องยนต์ต้นกำลัง ปั๊มครอลิกส์ และมอเตอร์ไฮดรอลิกส์ โดยปั๊มจะทำหน้าที่รับกำลังจากเครื่องยนต์แล้วเปลี่ยนกำลังทางกลดังกล่าวให้อยู่ในรูปของของไหล และส่งผ่านท่อน้ำมันไฮดรอลิกส์ไปยังมอเตอร์ไฮดรอลิกส์ จากนั้นมอเตอร์ไฮดรอลิกส์จะคืนกำลังในรูปของไหลกลับเป็นกำลังทางกล

เนื่องจากระบบไฮดรอลิกส์มีความซับซ้อนและเป็นระบบที่ไม่เชิงเส้นจึงเป็นเรื่องยากที่จะควบคุมอัตราทดของระบบถ่ายทอดกำลัง [1] ซึ่งความไม่เป็นเชิงเส้นและการออกแบบระบบที่ไม่ตรงกับระบบจริงจะมีผลทำให้เกิดค่าไม่ต่ำสุด (Non-minimum phase) กับระบบนอกจากสาเหตุดังกล่าวยังพบว่าสภาวะค่าไม่ต่ำสุดเกิดเนื่องมาจากอัตราส่วนความเร็วและการป้อนแรงบิด เข้าสู่ระบบถ่ายทอดกำลังแปรผันต่อเนื่อง [6] ถ้าพิจารณาคุณสมบัติภายในของระบบจะพบว่า การเกิดสภาวะค่าไม่ต่ำสุดเกิดเนื่องจาก Pole หรือ Zero ของระบบอยู่ฝั่งทาวขวามือของ Plane สำหรับระบบปิดเพื่อให้การติดตาม (tracking) ให้เข้าใกล้ศูนย์ทำได้ง่ายโดยใช้ค่าเกน - สูงๆ (High-gain) [3] อีกประการหนึ่งสภาวะค่าไม่ต่ำสุดนี้เกิดเนื่องมาจากพลศาสตร์ภายในของระบบไม่เสถียร (internal or zero dynamics are unstable) เทคนิคการควบคุมอาศัยเทคนิคแบบป้อนกลับความเป็นเชิงเส้นเพื่อแก้ปัญหาความไม่เป็นเชิงเส้น (feedback linearization control) [4] โดยธรรมชาติของสภาวะค่า

ไม่ต่ำสุดจะมีข้อจำกัดในการควบคุม นักวิจัยมากมายที่เสนอวิธีการแก้ปัญหา วิธีการหนึ่งที่เสนอคือการติดตามสัญญาณออก (Output) ในส่วนของค่าที่ไม่รู้ (Uncertainty) ของระบบที่ไม่เชิงเส้นภายใต้เงื่อนไขระบบไฮเปอร์โบลิกไม่เชิงเส้น (Nonlinear hyperbolic) ที่จุดศูนย์กลางของพลศาสตร์ภายใน (Origin internal dynamics) โดยใช้หลักการความเป็นเชิงเส้น (Linear) แก้ปัญหาความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบเทคนิคทางพีชคณิต และสไลดิงโหมด (Sliding mode) ควบคุมการลู่เข้าสามารถจัดการกับปัญหาสภาวะค่าไม่ต่ำสุดได้ [2] ต่อมาได้มีการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการกลับกัน (Inversion) ในการแก้ปัญหาสภาวะค่าไม่ต่ำสุดในสมการไม่เชิงเส้นซึ่งทำให้สมรรถนะการติดตามระบบดีมาก [5] การควบคุมแบบหน่วงเวลา (Time Delay Control: TDC) มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง โดยระบบลู่เข้าเมื่อการเลือกค่าการขยายสัญญาณควบคุมเป็นไปตามเงื่อนไข $|1 - b\hat{b}^{-1}| < 1$ [8] กล่าวคือระบบจะมีเสถียรภาพ การเลือกค่าขยายการควบคุมเป็นไปได้อย่างเนื่องจากเราไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ของระบบได้ โดยต้องอาศัยการลองผิดลองถูก เนื่องจากยังมีข้อจำกัดในการควบคุมสภาวะค่าไม่ต่ำสุด

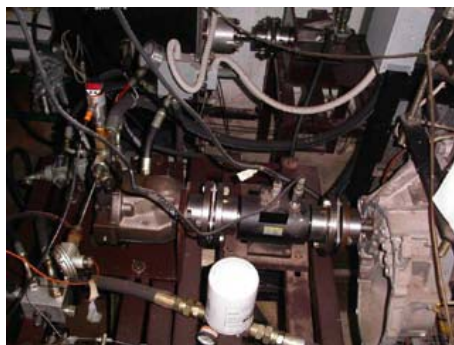
ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบพัฒนาตัวควบคุม เพื่อจัดการกับปัญหาสภาวะค่าไม่ต่ำสุดที่เกิดขึ้นกับระบบถ่ายทอดกำลังอุทกสถิตแบบอัตราทดแปรผันต่อเนื่อง โดยใช้วิธีการ กำหนดสัญญาณออกใหม่ (Output redefinition method) เพื่อจะสามารถลดค่าคลาดเคลื่อน (error) ของระบบได้โดยอาศัยหลักการ กำหนดฟังก์ชันสัญญาณออก (Output Function) เลือกพิจารณาค่าสัญญาณออกที่เวลาเดียวกันกับลำดับของระบบ ซึ่งหลักการนี้จะทำให้ไม่มี Zero-dynamics แต่วิธีนี้ยังมีข้อจำกัดกล่าวคือค่าสัญญาณที่เราไม่ได้นำมาพิจารณานั้นยังคงมีพารามิเตอร์ที่ทำให้ระบบติดตามค่าอ้างอิงเพียงช่วงเวลาหนึ่ง จึงมีการการประยุกต์ใช้กับพื้นฐาน

การหน่วงเวลาเพื่อขจัดปัญหาความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นกับระบบ

2. ระบบถ่ายทอดกำลังอุทกสถิตแบบอัตราทดแปร

พื้นต่อเนื่อง

ระบบถ่ายทอดกำลังอุทกสถิตแบบอัตราทดแปรพื้นต่อเนื่องจะเลือกใช้ชนิดปั๊มและมอเตอร์แบบปริมาตร การขจัดแปรผัน (Variable displacement pump with variable displacement motor : PVMV) เนื่องจากเป็นรูปแบบที่ใช้งานได้กว้างขวาง [6] ส่วนประกอบที่สำคัญในระบบนี้คือ เครื่องยนต์ต้นกำลัง ปั๊มไฮดรอลิก และมอเตอร์ไฮดรอลิก โดยปั๊มจะทำหน้าที่รับกำลังจากเครื่องยนต์แล้วเปลี่ยนกำลังทางกลดังกล่าวให้อยู่ในรูปของของไหลและส่งผ่านท่อน้ำมันไฮดรอลิกไปยังมอเตอร์ไฮดรอลิก จากนั้นมอเตอร์ไฮดรอลิกจะคืนกำลังในรูปของไหลกลับเป็นกำลังทางกล การทดลองเพื่อทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมนั้นจะทำการจำลองจากพฤติกรรม non - minimum phase นั้นโดยใช้ Transfer functions ใน Matlab



รูปที่ 1 แสดงระบบถ่ายทอดกำลังอุทกสถิตชนิด PVMV

ปั๊มและมอเตอร์ไฮดรอลิกเชื่อมต่อกันโดยท่อน้ำมันด้านความดันสูงวัตถุประสงค์ของการควบคุมเพื่อให้ความดันที่ได้ในเส้นทางไฮดรอลิก (Hydraulic line) เป็นไปตามค่าความดันที่ต้องการ

$$r_{CVT} = \frac{T_p}{T_m} = \frac{n_m}{n_p} = \frac{D_p}{D_m} \quad (18)$$

โดยสัญญาณควบคุมคือแรงดันทางไฟฟ้าที่แปลงผ่านแอมพลิฟายเออร์ (Amplifier) เป็นกระแสเพื่อเข้าสู่วาล์ว

3. ออกแบบตัวควบคุม

การควบคุมระบบที่เกิดสถานะค่าไม่ต่ำสุดมีการศึกษาวิจัยอย่างแพร่หลายเนื่องจากยังมีข้อจำกัดหลายประการ จึงยังไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมระบบ ที่เกิดสถานะค่าไม่ต่ำสุดได้นั้นเพราะไม่สามารถทำให้ค่าต่างๆย้อนกลับได้ ในที่นี้ลักษณะโดยทั่วไปของผลจะเป็นเชิงเส้น ซึ่งจะกลับกันกับ Transfer Function ของสถานะค่าไม่ต่ำสุด ที่เกิดกับระบบที่เป็นเชิงเส้นคือจะทำให้ระบบไม่เสถียร[4] ดังนั้นสำหรับระบบที่เกิดสถานะค่าไม่ต่ำสุดอีกหนึ่งวิธีที่ทำการศึกษาคือ กำหนดสัญญาณออกใหม่ (Output-redefinition method) เพื่อจะสามารถลดค่าคลาดเคลื่อน (Error) ของระบบได้โดยอาศัยหลักการ กำหนดฟังก์ชันสัญญาณออก (Output Function)

$$y_1 = h_1(x) \quad (1)$$

ดังนั้นจะทำให้ผลของ Zero-dynamics เสถียรภายใต้ฟังก์ชันสัญญาณออกค่าใหม่แต่ระบบเดิม

การควบคุมแบบคงทน (Robust control) เป็นการควบคุมที่มีผู้ให้ความสนใจ ด้วยเหตุผลที่สามารถจัดการกับความไม่แน่นอนเชิงเส้นของระบบและชดเชยค่าความไม่แน่นอนได้เป็นอย่างดี [1] ประกอบกับการควบคุมแบบหน่วงเวลาเป็นการควบคุมแบบคงทนมีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางและพัฒนาอย่างต่อเนื่องจึงได้นำเทคนิคมาประยุกต์ใช้การออกแบบระบบ

เนื่องจากหลักการ redefinition คือ การทำให้พารามิเตอร์เป็นเชิงเส้น เพื่อพิจารณาเฉพาะค่าสัญญาณออกแต่สำหรับสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นแล้วพารามิเตอร์ในค่าสัญญาณเข้ายังคงมีผลกับพลศาสตร์ภายใน ซึ่งทำให้ระบบเกิดความไม่แน่นอนจึงนำเทคนิควิธีแบบหน่วง

เวลามาประยุกต์ใช้ร่วมเพื่อจัดการกับค่าความไม่แน่นอนของระบบ

3.1 การออกแบบตัวควบคุม

จะพิจารณาการติดตามการควบคุมของระบบที่เป็นเชิงเส้น

$$\dot{x}_1 = x_2 + u \quad (2)$$

$$\dot{x}_2 = -u \quad (3)$$

$$y = x_2 \quad (4)$$

กำหนดให้ $\dot{x}_1$ สัญญาณออก u ค่าสัญญาณควบคุม $\dot{x}_2$ สัญญาณเข้า

จากสมการ (2), (3), (4) หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณออก y และค่าสัญญาณควบคุม u โดยหาอนุพันธ์ของ y จะได้สมการใหม่คือ

$$\dot{y} = x_2 + u \quad (5)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่า $\dot{x}_2$ เป็นพลศาสตร์ภายในของระบบดังนั้นจะใช้วิธีการ redefinition เพื่อพิจารณาการเกิดปัญหาสถานะค่าไม่ต่ำสุดโดย Transfer function สมการ (5) ได้สมการใหม่คือ

$$w(p) = \frac{p-1}{p^2} \quad (6)$$

จากสมการ (6) พบว่า $p=1$ ทำให้ Zero - dynamics ของระบบอยู่ฝั่งขวามือของ Plant ทำให้ระบบนี้เกิดสถานะค่าไม่ต่ำสุด การออกแบบจึงใช้เทคนิคในการจัดการกับ Zero - dynamics จะได้ว่า

$$y_t = \frac{p-1}{p^2} u \quad (7)$$

จะเห็นได้ว่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ระบบเกิดสถานะค่าไม่ต่ำสุดคือ p ดังนั้นเราจะไม่พิจารณา p จะได้

$$\dot{y}_t = -u \quad (8)$$

ซึ่งจะได้ค่าสัญญาณใหม่ซึ่งค่าสัญญาณใหม่ที่ได้จะไม่เกิด Zero - dynamics ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดสถานะค่าไม่ต่ำสุด

จากสมการค่าความผิดพลาดวงปิด

$$\ddot{e} + \dot{e} + e = 0 \quad (9)$$

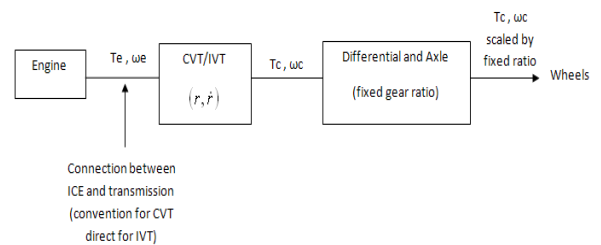
เมื่อกำหนดให้ $e = y - y_d$ จะได้ค่าสัญญาณควบคุมใหม่คือ

$$u = -\ddot{y}_d + \dot{e} + e \quad (10)$$

จะได้ค่าสัญญาณควบคุมใหม่ที่ Zero-dynamics เสถียรภายใต้ฟังก์ชันสัญญาณออกค่าใหม่แต่ระบบเดิม

3.2 การออกแบบตัวควบคุมของระบบ CVT

สถานะค่าไม่ต่ำสุดเกิดเนื่องมาจากพลศาสตร์ภายใน (Internal dynamics) ไม่เสถียรซึ่งพลศาสตร์ภายในจะไม่สามารถเห็นได้จากความสัมพันธ์ของสัญญาณ เข้า-ออก ภายนอก (External input-output)



รูปที่ 2 แสดงกระบวนการของระบบส่งกำลัง

จากรูปที่ 1 จะได้สมการของระบบ CVT ซึ่งเป็นสมการไม่เชิงเส้น

$$\dot{\omega}_c = \frac{1}{I_c + I_e r^2} (r T_e - I_e \omega_c r \dot{r} - T_i) \quad (11)$$

$$\dot{r} = -r + u \quad (12)$$

$$y = \omega_c \quad (13)$$

โดยที่ $\dot{\omega}_c$ ความเร่งขาออกของ CVT r อัตราส่วนความเร็ว T_i ภาระแรงบิด T_e แรงบิดเครื่องยนต์ I_c ความเฉื่อยของรถยนต์ I_e ความเฉื่อยเครื่องยนต์

เนื่องจากค่าสัญญาณออกของระบบยังไม่พบค่าสัญญาณควบคุม u จึงต้องอาศัยวิธีการ input-output linearization จะได้ค่าสัญญาณออก y ตัวใหม่ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าสัญญาณเข้า u

$$\dot{y} = \frac{1}{I_c + I_e r^2} (r T_e + I_e \omega_c r^2 - I_e \omega_c r u - T_i) \quad (14)$$

จากสมการ (10) จะพบว่าพลศาสตร์ภายในของระบบคือ $\dot{r}$ ซึ่งไม่เสถียรทำให้ระบบเกิดปัญหาสถานะค่าไม่ต่ำสุด

จัดรูปสมการใหม่โดยพิจารณาเฉพาะเทอมที่สัมพันธ์กับค่าสัญญาณควบคุม u จะได้สมการเทอมที่ไม่สัมพันธ์กับ u อยู่ในรูปของฟังก์ชัน

$$\dot{y} = \frac{I_e \omega_c r}{I_c + I_e r^2} u + f(x) \quad (15)$$

จะได้สมการค่าสัญญาณควบคุมสำหรับหักล้างเทอมของความไม่แน่นอนตามสมการ

$$u = [v - f(x)] \left[\frac{I_c + I_e r}{I_e \omega_c r} \right] \quad (16)$$

จากการออกแบบตัวควบคุมกำหนดให้ $\dot{y} = v$ และจะได้สมการค่าความผิดพลาดคงที่

$$\ddot{e} + \dot{e} + e = 0 \quad (17)$$

จากเทคนิคแบบหนึ่งเวลาเพื่อจัดการกับความไม่แน่นอนเชิงเส้นของระบบและชดเชยค่าความไม่แน่นอนจะได้ว่า

$$f(x) = \dot{y} + \frac{I_e \omega_c r}{I_c + I_e r^2} u \quad (18)$$

สมการ (16) และ (14) ค่าพารามิเตอร์บางตัวจะถูกหักล้างจากการประยุกต์ใช้เทคนิคแบบหนึ่งเวลาจะได้สมการใหม่

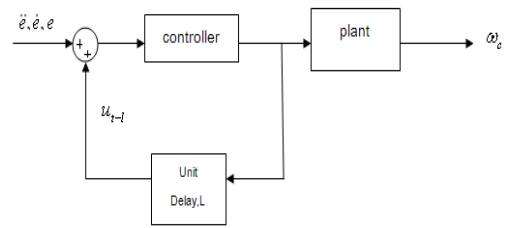
$$u_t = [\dot{v}_t - \dot{y}_{t-l}] \left[\frac{I_c + I_e r}{I_e \omega_c r} \right] + u_{t-l} \quad (19)$$

เทคนิค Output-redefinition method พิจารณาจากสมการ (11) จะทำการตัดค่าสัญญาณเข้าออกและเลือกพิจารณาเฉพาะค่าสัญญาณออกที่เวลาเดียวกับระบบจะได้ค่าสัญญาณควบคุมดังสมการ

$$u_t = v_t + u_{t-l} - \dot{y}_{t-l} \quad (20)$$

เมื่อกำหนดให้ $v_t = \ddot{y}_d + \dot{e} + e$ ที่เวลาเดียวกันกับระบบ

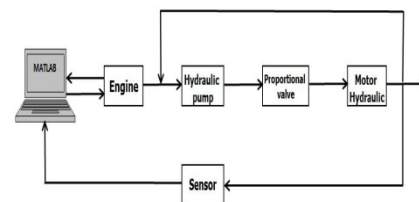
จากตัวควบคุมที่ออกแบบโดยโปรแกรม Simulation link สร้างบล็อกไดอะแกรมของระบบดังรูป



รูปที่ 3 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบ

4. สร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ผล

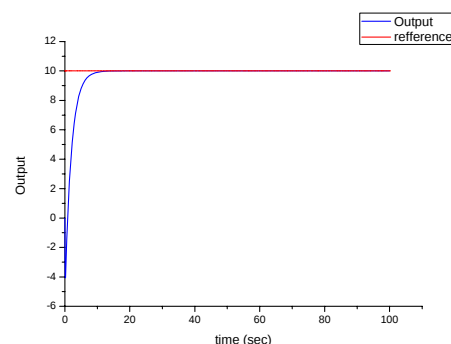
ทำการสร้างสมการที่เกิดปัญหาสถานะค่าไม่ต่ำสุดโดยจำลองปัญหาใน matlab ทำการควบคุมระบบ CVT ในโปรแกรม Simulink โดยใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบ เพื่อทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุม



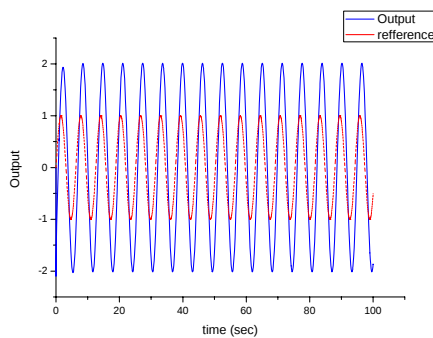
รูปที่ 3 ไดอะแกรมจำลองการทำงานของระบบ CVT

4.1 การทดลองตัวควบคุม

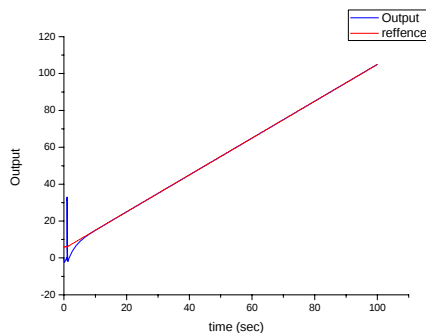
ค่าสัญญาณควบคุมใหม่ที่ Zero-dynamics เสถียรภายใต้ฟังก์ชันสัญญาณออกค่าใหม่แต่ระบบเดิมนั้นเมื่อนำมาจำลองการควบคุมในโปรแกรมพบว่า



รูปที่ 4 ผลตอบสนองเมื่อสัญญาณเข้าเป็นขั้นบันได

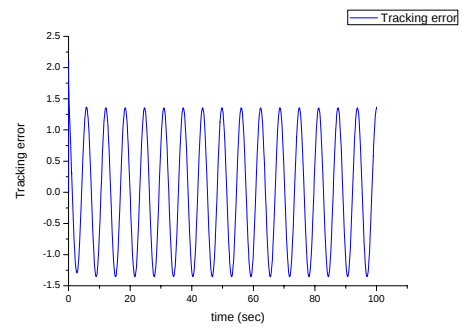
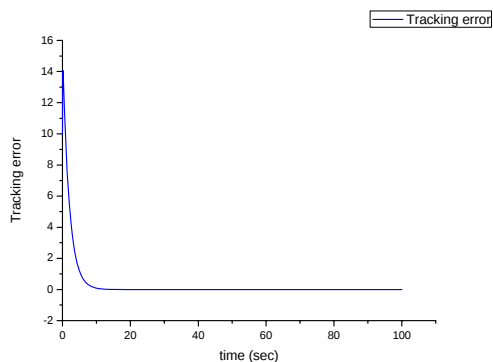


รูปที่ 5 ผลตอบสนองเมื่อสัญญาณเข้าเป็นฟังก์ชันไซน์



รูปที่ 6 ผลตอบสนองเมื่อสัญญาณเข้าฟังก์ชันแรมพ์

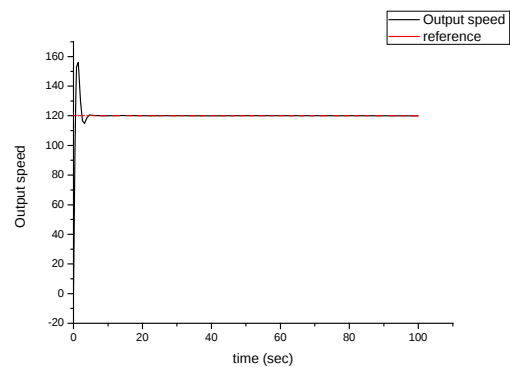
จากรูปที่ 4, 5, 6 พบว่าค่าสัญญาณออกมีการติดตามค่าสัญญาณอ้างอิงตามที่ต้องการกล่าวคือตัวควบคุมที่ออกแบบมีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาสถานะค่าไม่ต่ำสุดที่เกิดกับระบบที่เป็นเชิงเส้นอ้างอิงจากรูปที่ แสดงให้เห็นค่าคลาดเคลื่อนของระบบที่เข้าสู่ศูนย์



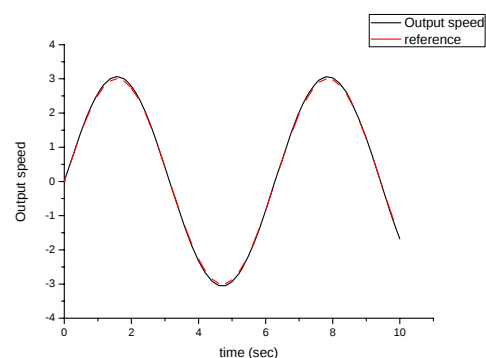
รูปที่ 7 Tracking errorเมื่อสัญญาณเข้าเป็นแบบต่างๆ

4.2 การทดลองตัวควบคุมของระบบ CVT

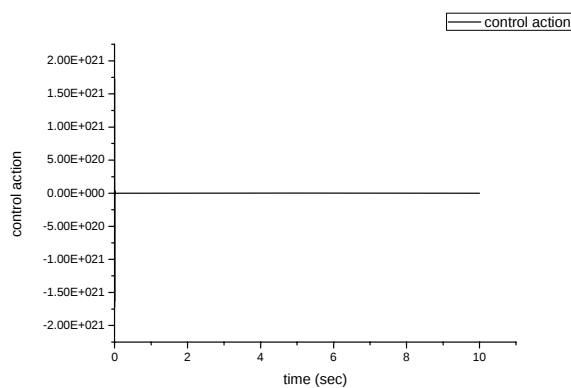
เมื่อมีการควบคุมระบบโดยใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบไว้อย่างเหมาะสมแล้วทำการจำลองแก้ปัญหาสถานะค่าไม่ต่ำสุดระบบ CVT โดยโปรแกรมพบว่า



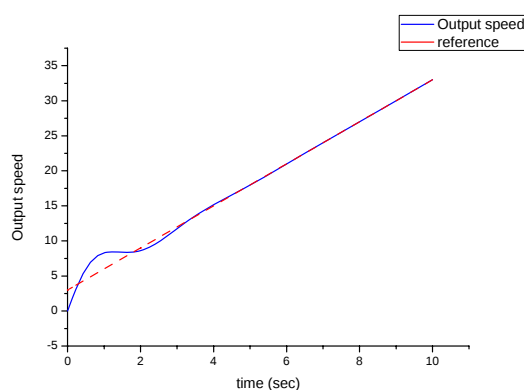
รูปที่ 8 ผลตอบสนองเมื่อสัญญาณเข้าเป็นขั้นบันได



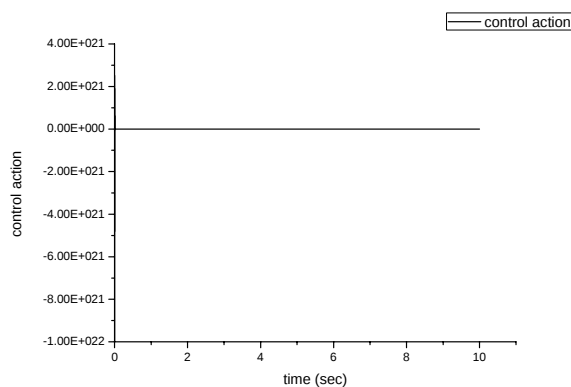
รูปที่ 9 ผลตอบสนองเมื่อสัญญาณเข้าเป็นฟังก์ชันไซน์



รูปที่ 10 control action เมื่อสัญญาณเข้าเป็นฟังก์ชันไซ



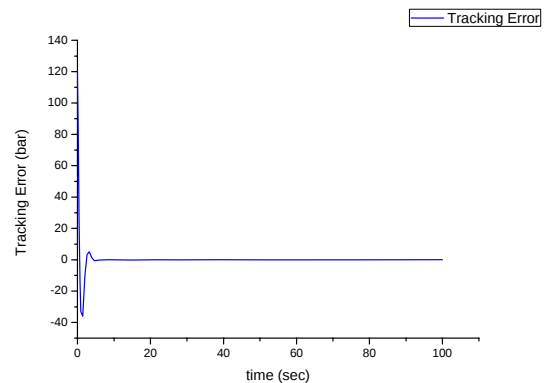
รูปที่ 11 ผลตอบสนองเมื่อสัญญาณเข้าฟังก์ชันแรมพ์



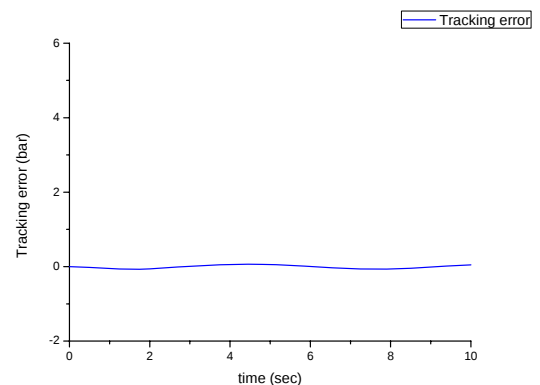
รูปที่ 12 control action เมื่อสัญญาณเข้าฟังก์ชันแรมพ์

การควบคุมระบบเมื่อกำหนดค่าสัญญาณอ้างอิงแบบต่างๆดังรูปที่ 8, 9, 10, 11 และ 12 จะพบว่าค่าสัญญาณมีการติดตามค่าสัญญาณอ้างอิงตามที่ต้องการและค่า Control action มีค่าลู่เข้าสู่ศูนย์ กล่าวคือสัญญาณตอบสนองการทำงานของระบบสอดคล้องกับสัญญาณเข้าเป็นอย่างดีอ้างอิงได้จากรูปที่ 13, 14 และ 15 แสดงค่าคลาดเคลื่อนของผลตอบสนองระบบสำหรับค่า

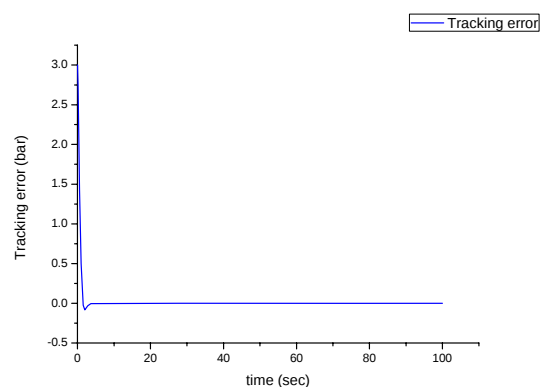
อ้างอิงแบบต่างๆ พบว่าค่าสัญญาณมีการติดตามที่ดีเห็นได้จากค่าคลาดเคลื่อนลู่เข้าสู่ศูนย์



รูปที่ 13 Tracking error เมื่อสัญญาณเข้าเป็นขั้นบันได



รูปที่ 14 Tracking error เมื่อสัญญาณเข้าเป็นฟังก์ชันไซ



รูปที่ 15 Tracking error เมื่อสัญญาณเข้าเป็นฟังก์ชันแรมพ์

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

การทดลองตัวควบคุมที่ออกแบบจากวิธีการ Output-redefinition พบว่าค่าสัญญาณออกมีการติดตามค่าสัญญาณอ้างอิงตามที่ต้องการกล่าวคือตัวควบคุมที่

ออกแบบมีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาสถานะค่าไม่ต่ำสุดที่เกิดกับระบบที่เป็นเชิงเส้นในทางกลับกันในระบบที่ไม่เชิงเส้นวิธีการ Output-redefinition อย่างเดียวยังไม่สามารถควบคุมระบบให้มีการติดตามที่ดีได้เท่าที่ต้องการเนื่องมาจากระบบถ่ายทอดกำลังอุทกสถิตแบบอัตราทดแปรผันต่อเนื่องมีความไม่เชิงเส้น และพิจารณาเฉพาะค่าสัญญาณออกซึ่งในค่าสัญญาณเข้าที่ไม่ทำการพิจารณานั้นยังคงมีพารามิเตอร์ที่มีผลทำให้พลศาสตร์ภายในของระบบไม่เสถียร เมื่อทำการประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคนิคการหน่วงเวลา พบว่าสามารถจัดการกับปัญหาสถานะค่าไม่ต่ำสุดที่เกิดขึ้นกับระบบถ่ายทอดกำลังอุทกสถิตแบบอัตราทดแปรผันต่อเนื่องได้เป็นอย่างดีเนื่องจากสามารถจัดการกับพลศาสตร์ภายในให้เสถียร วิธีที่เสนอผลตอบสนองแสดงถึงประสิทธิภาพของตัวควบคุมสามารถควบคุม กล่าวคือสัญญาณตอบสนองการทำงานของระบบสอดคล้องกับสัญญาณเข้าเป็นอย่างดีนอกจากนี้ยังสามารถลดปัญหาการเลือกค่าสัญญาณควบคุม การควบคุมจึงมีเสถียรภาพและง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้

อย่างไรก็ตามผลลัพธ์ที่น่าเสนอในบทความนี้เป็นเพียงการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เท่านั้น ซึ่งต่างจากระบบจริงซึ่งมีความไม่เป็นเชิงเส้นอื่นๆ นอกเหนือจากที่กำหนด จึงควรมีการนำตัวควบคุมที่ออกแบบไปประยุกต์ใช้กับการควบคุมระบบระบบถ่ายทอดกำลังอุทกสถิตแบบอัตราทดแปรผันต่อเนื่องจริงต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์การทดลองในการทำวิจัย อาจารย์คณาจารย์ทุกท่านและมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร สำหรับคำปรึกษา

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] อาทิตย์ แสงงาม. (2009). "A Transmission ratio control of a hydrostatic CVT power train," The 23rd Conference of Mechanical engineering Network of Thailand, Nov 4-7, 2009(Conf. Pub Chiang-Mai).
- [2] Ilya A Shkolnikov and Yuri B. Shtessel. (2002). Tracking in class of non-minimum phase system with nonlinear internal dynamics via sliding mode control using method of system center, automatical vol. 38,pp. 837-842.Sharon
- [3] Frank L. Lewis.(1992). Applied Optimal Control And Estimation, PrinceHall International Inc., New Jersey, USA
- [4] Slotine, J.J.E. and Li, W. (1991). *Applied Nonlinear Control*, PrinceHall International Inc., New Jersey, USA.
- [5] Degang Chen and Brad Paden. (1996). Stable inversion of nonlinear non-minimum phase system, INT.J.Control, vol. 64, NO. 1, pp. 81-97
- [6] Sharon Lui and Brad Paden. (1997). A Survey of today's CVT control,Conference on Decision & Control, San diego, California, USA.
- [7] Petros A. Ioannou and Jing Sun. Robust Adaptive Control, Prentice-Hall International, Inc, New Jersey, USA
- [8] Youcef-Toumi, K., and Wu, S-T. (1992). Input/output linearization using time delay control, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME, vol. 114(1), pp. 10-19.