

การควบคุมทอร์คของมอเตอร์ไฮดรอลิกส์ด้วย PWM Torque control of hydraulic motor with PWM

ภพพล พรหมเทพ¹, ปิโยรส จิระวัฒนา¹ และ ธนา ราษฎร์ภักดี²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40000

² ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40000

* ติดต่อ : โทรศัพท์: 083 4198385

E-mail: poppchol.hams@hotmail.com

P.Popphol^{1*}, J.Piyoros¹, and R.Thana²

¹ Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Khon Kaen University,
Khon Kaen, Thailand 40002

² Industrial Engineering Department, Faculty of Engineering, Khon Kaen University,
Khon Kaen, Thailand 40002

*Corresponding Author: Tel: +(66)83419-8385

E-mail: poppchol.hams@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ได้เสนอการควบคุม ทอร์ค ของมอเตอร์ไฮดรอลิกส์ โดยการใช้สัญญาณควบคุมในลักษณะ PWM (pulse width modulation) เพื่อควบคุมการทำงานของ solenoid valve โดยที่ค่าแรงบิดที่ได้มีความสัมพันธ์กับความดันของไฮดรอลิกส์ขาเข้า และ ปริมาณการกระจัดของลูกสูบ ซึ่งปริมาณการกระจัดของลูกสูบมีความสัมพันธ์กับระยะการกระจัดเชิงมุมของ Swashplate และสามารถควบคุมการกระจัดเชิงมุมของ Swashplate ผ่านการควบคุม เปิด-ปิด ของ Solenoid valve และ งานวิจัยนี้ยังได้แสดงถึงการจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งอธิบายถึงการทำงาน ของโครงสร้างมอเตอร์ไฮดรอลิกส์ ซึ่งประกอบด้วย อัตราเร่งเชิงมุมของ Swashplate ความสัมพันธ์การกระจัดเชิงมุมของ Swashplate กับปริมาณการกระจัดของลูกสูบ และ สมการทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฮดรอลิกส์ เพื่อนำมาใช้จำลองและควบคุม ทอร์ค ของ มอเตอร์ไฮดรอลิกส์ จากการจำลองพบว่าการควบคุมด้วยการใช้สัญญาณแบบ PWM สามารถควบคุม ทอร์ค ของมอเตอร์ไฮดรอลิกส์ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และพบว่า ทอร์ค ที่ได้มีความสัมพันธ์กับ duty ratio และ ความถี่ การทำงานของ Solenoid valve

คำสำคัญ: Pulse width modulation, Solenoid valve , Swash plate , Hydraulic motor.

Abstract

This study deals with the torque control of a hydraulic motor by PWM signal technique. The proposed technique is advantage for control the solenoid valve. The torque was depended on the inlet pressure of hydraulic and volume of cylinders which was relative to an angular displacement of swash-plate. The angular displacement was controlled via on-off the solenoid valve. In addition, in this paper presents the mathematic modeling which details the structure of hydraulic motor, and mathematic modeling, consists of angular acceleration of swash-plate, the relation between an angular displacement of swash-plate and the volume of cylinder, the mathematical modeling of hydraulic motor. All of them were advance for construct the simulation of torque control. The simulation results show that the PWM signal able to control torque of hydraulic motor to stable. Moreover, the torque was depended on the duty ratio and the operating frequency on-off of a solenoid valve.

Key words: Pulse width modulation, Solenoid valve, Swash plate, Hydraulic motor.

1. บทนำ

ในปัจจุบัน ระบบไฮดรอลิกส์ได้มีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ทั้งในงานทางด้านอุตสาหกรรมการผลิต งานก่อสร้าง และ งานซ่อมบำรุงที่เห็นได้ในชีวิตประจำวันบางประเภท ด้วยเหตุผลที่ว่า หากเทียบกับระบบไฮดรอลิกส์กับระบบส่งถ่ายพลังงานอื่นๆ เช่น ระบบ นิวเมติกส์ ระบบเครื่องกล หรือระบบไฟฟ้า แล้วระบบไฮดรอลิกส์จะสามารถรับแรง (Load) ได้สูงมากทั้งแรงในแนวเส้นตรง และแนวหมุน สามารถส่งถ่ายพลังงานไปในที่ไกลๆโดยผ่านทางสายไฮดรอลิกส์โดยไม่ต้องใช้โซ่หรือเฟืองส่งกำลังเหมือนระบบเครื่องกลและ ระบบไฮดรอลิกส์มีราคาถูกกว่าหากเทียบกับภาระแรง (Load) ที่เท่ากัน

ระบบส่งกำลังก็เป็นอีกหนึ่งในการนำเอาระบบไฮดรอลิกส์มาใช้ โดยหลักการทำงานจะมีเครื่องยนต์ต้นกำลังให้พลังงานกลเข้าสู่ปั๊ม ปั๊มจะทำหน้าที่เปลี่ยนรูปพลังงานจากเครื่องยนต์มาเป็นกำลังในรูปของไหล แล้วส่งไปยังมอเตอร์ ซึ่งจะทำหน้าที่เปลี่ยนกำลังจากของไหลเป็นกำลังในการขับเคลื่อน ต่อไป

มอเตอร์ไฮดรอลิกส์เป็นส่วนหนึ่งของระบบไฮดรอลิกส์ ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานของไหลให้เป็นพลังงานกล โดยทั่วไปแล้วมอเตอร์ไฮดรอลิกส์จะรับพลังงานของไหลจากปั๊ม ซึ่งค่าทอร์คที่ได้จะขึ้นอยู่กับพลังงานของไหลที่ได้รับจากปั๊ม และปริมาตรการจัด

ของลูกสูบ หากได้รับพลังงานของไหลจากปั๊มคงที่แล้ว การที่จะปรับให้ได้ค่าทอร์คที่ได้จากมอเตอร์ จะต้องปรับที่ปริมาตรการจัดของลูกสูบโดยปริมาตรการจัดของลูกสูบจะแปรผันตรงกับมุมของ Swash-plate ซึ่งจะมีพลังงานของไหลที่มาจากปั๊มเป็นกลไกทำให้เกิดแรงผลักดันให้เกิดมุมของ Swash-plate โดยทั่วไปการที่จะปรับปริมาตรการจัดของลูกสูบจะติดตั้งวาล์ว เช่น Proportional valve ที่สามารถปรับเพิ่ม-ลด พลังงานของไหลที่จะเป็นกลไกหลักที่เกิดแรงผลักดันที่ Swash-plate จะเรียกมอเตอร์แบบนี้ว่า ปริมาตรการจัดแปรผัน ซึ่งมีราคาสูงหากเทียบกับมอเตอร์แบบปริมาตรการจัดคงที่

มอเตอร์ไฮดรอลิกส์แบบปริมาตรการจัดของลูกสูบ 2 ตำแหน่ง (Max – Min) มีราคาถูกกว่า และมีการสูญเสียพลังงานของไหลน้อยกว่าหากเทียบกับแบบปริมาตรการจัดแปรผัน โดยลักษณะการทำงานของมอเตอร์ประเภทนี้จะมีการทำงานแบบเปิด-ปิด (On-Off) เท่านั้น โดย หลักการทำงาน จะควบคุมการเปิด-ปิด ผ่าน On-Off Solenoid valve เมื่อวาล์วทำงาน พลังงานของไหลจากปั๊มจะเข้าไปผลักดัน Swash-plate จนเกิดมุมสูงสุดซึ่งมุมนี้จะมีความสัมพันธ์กับปริมาตรการจัดของลูกสูบในการเปลี่ยนพลังงานของไหลเป็นพลังงานกล หาก วาล์วปิดตำแหน่งของ Swash-plate จะกลับมามีตำแหน่งปิด

(มุมต่ำสุด) ไม่เกิดระยะการกระจัดของลูกสูบ จากลักษณะการทำงานดังกล่าว ค่าทอร์คที่ได้จากมอเตอร์ มีได้แก่ทอร์คสูงสุด กับ ทอร์คต่ำสุดเท่านั้น

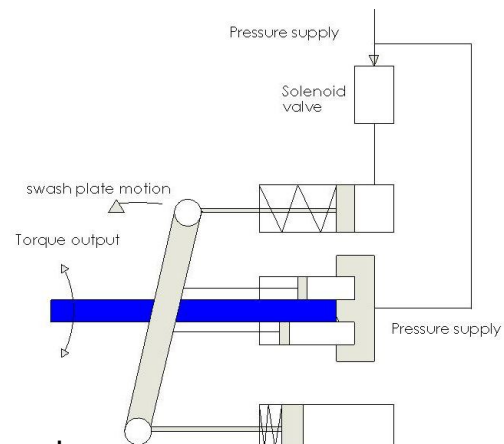
ปัจจุบันการนำเอาสัญญาณควบคุมลักษณะ PWM (Pulse-width modulation) มาใช้ในงานไฟฟ้า หรือ มอเตอร์ไฟฟ้ากันอย่างแพร่หลาย ซึ่งเป็นการง่าย เนื่องจากสัญญาณไฟฟ้า และระบบที่มีพลังงานไฟฟ้า เป็นตัวขับเคลื่อน ตอบสนองสัญญาณได้ดี มีความไว ในการตอบสนองสัญญาณสูง แต่การใช้สัญญาณ ลักษณะ PWM มาใช้ในงาน Hydraulic ยังมีข้อจำกัด อยู่ เนื่องจากปัญหาเรื่องความล่าช้าในการตอบสนอง สัญญาณมีมากกว่างานไฟฟ้า จึงต้องมีการออกแบบ การชดเชยเพื่อชดความล่าช้าของระบบไฟฟ้า การทำงานของลักษณะสัญญาณ PWM จะเป็นการให้ สัญญาณที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นลักษณะ pulse โดยจะใช้ความกว้างของ pulse เป็นตัวกำหนดการ ทำงานของอุปกรณ์ ในงานวิจัยได้มีการนำ PWM มา ประยุกต์ใช้ในงานไฮดรอลิกส์บางประเภทTanaka[1] และ Heon-Sul jeong [2] ได้นำเสนอการใช้สัญญาณ PWM มาประยุกต์ใช้ในงาน Hydraulic โดยนำ สัญญาณ PWM มาควบคุมความดันของ Chamber ผ่านการควบคุม Three way On-off Solenoid valve ให้ทำงานโดยใช้สัญญาณควบคุมลักษณะ PWM พบว่า ค่าความดันที่ได้ขึ้นอยู่กับ pulse period และ duty ratio โดย ค่า duty ratio จะส่งผลถึงระดับค่า ความดัน ส่วนค่า pulse period จะส่งผลถึงขนาดของ คลื่นความดันขาออก ซึ่งความดันนี้หากนำมา ประยุกต์ใช้กับมอเตอร์ไฮดรอลิกส์จะเป็นพลังงานของ ไหล่ที่จะเป็นแรงเข้าไปผลักทำให้เกิดมุมของ Swash-plate

งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฮดรอลิกส์แบบปริมาตรการ กระจัด 2 ตำแหน่งที่รวมเอาการทำงาน ของ On-off Solenoid valve เข้าไปด้วย และเทคนิคการปรับค่า ทอร์คของมอเตอร์ภายใต้ความดันที่เข้าสู่ระบบคงที่ (PFMV) ได้โดย ใช้ลักษณะการทำงานแบบ Pulse Width Modulate (PWM) โดยการส่งสัญญาณ PWM

ไปที่ Solenoid valve ให้ทำงานเป็นช่วงๆ โดย เทคนิคนี้จะช่วยให้สามารถทำให้ปรับค่าทอร์คที่ได้ ตามภาระ (duty ratio) และ ปรับผลต่างคลื่นของทอร์ค ตามความถี่ (สัมพันธ์กับค่า pulse period) ของ ลักษณะการทำงานแบบ PWM

จากการศึกษาระบบการทำงานของมอเตอร์ไฮดรอลิกส์ (จากรูปที่ 1.) เมื่อพลังงานของไหลเข้าสู่ ระบบจะแยกเป็น 2 ด้าน คือ ไหล่เข้าสู่ Solenoid valve และ ไหล่เข้าสู่กระบอกสูบที่ทำหน้าที่ขับเคลื่อน ให้หมุน ซึ่งหากความดันที่เข้าสู่ระบบมีค่าคงที่ การจะ ปรับให้ได้ทอร์คตามต้องการนั้นต้องปรับที่ตัวควบคุม ปริมาตรการกระจัดของลูกสูบ ซึ่งก็คือมุมของ Swash-plate โดยที่มุมของ Swash-plate จะมีความสัมพันธ์ กับความดันที่ Solenoid valve ปลอยออกมา ซึ่ง จะสามารถแยกส่วนประกอบการทำงานได้ 3 ส่วนหลักๆ คือ

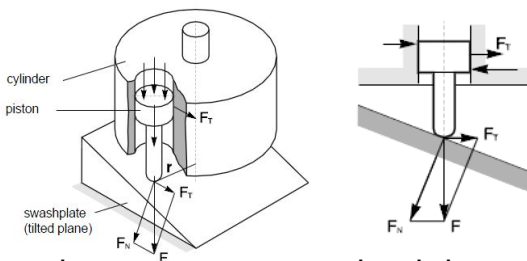
1. ทอร์คที่ได้จากตัวมอเตอร์ไฮดรอลิกส์ (Torque output of hydraulic motor)
2. ระบบการเคลื่อนที่ของแผ่นเอียง (Swash-plate motion system)
3. ระบบการทำงานของ Solenoid valve และ สัญญาณ PWM (Solenoid valve system)



รูปที่ 1. แสดงระบบการทำงานของมอเตอร์ไฮดรอลิกส์

**2. ลักษณะการทำงานของมอเตอร์ไฮดรอลิก
ลิกส์แบบปริมาตรการกระจัดของลูกสูบ 2
ตำแหน่ง**

**2.1. ทอร์กที่ได้จากตัวมอเตอร์ไฮดรอลิกส์
(Torque output of hydraulic motor)** มอเตอร์ไฮ
ดรอลิกส์ทำหน้าที่รับพลังงานของไหลในรูปของความ
ดัน เปลี่ยนเป็นพลังงานกล ซึ่งจะออกมาในรูป ทอร์ก
และความเร็วรอบ โดยค่าทอร์กที่ได้จะมีความสัมพันธ์
กับความดันที่เข้าสู่ระบบ และ ปริมาตรการกระจัด



**รูปที่ 2. แสดงทิศทางการเคลื่อนที่เมื่อแรงของ
ลูกสูบกระทำกับแผ่นเอียง**

โดยค่าทอร์กที่ได้จะสามารถหา ได้จาก

$$T = PD \quad (1)$$

โดยที่ $T =$ ทอร์ก

$P =$ ความดันที่เข้าสู่ระบบ

$D =$ ปริมาตรการกระจัดของลูกสูบ (ทั้งหมด)

จากสมการที่ (1) หากกำหนดความดันที่เข้าสู่
ระบบมอเตอร์คงที่การที่ปรับค่า ทอร์ก ให้ได้ตาม
ต้องการต้องปรับที่ปริมาตรการกระจัดของลูกสูบ ซึ่ง
ปริมาตรการกระจัดของลูกสูบสามารถควบคุมผ่านมุม
ของ Swash-plate ซึ่งเมื่อมุมเอียงมีขนาดที่มากจะทำ
ให้ช่วงระยะการเคลื่อนที่ของกระบอกสูบเคลื่อนที่ไป
ได้มากทำให้มีปริมาตรการกระจัดของกระบอกสูบมาก
เช่นเดียวกันหากต้องการให้ได้ปริมาตรการกระจัดที่
น้อยลงก็ทำการลดขนาดของมุมเอียงลง

โดยสามารถ อธิบายได้จากสมการ

$$D = \frac{\pi z d^2 r \tan \theta}{2} \quad (2)$$

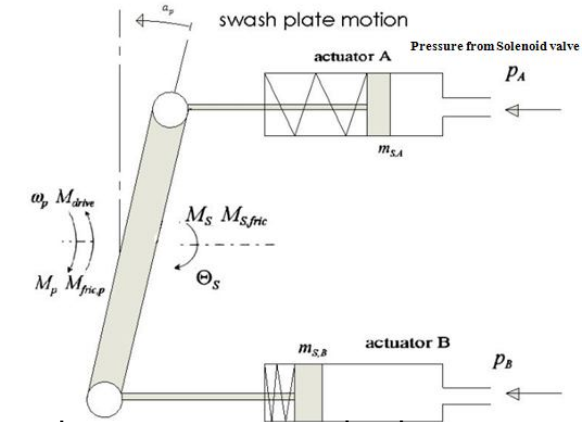
โดยที่ $z =$ จำนวนของกระบอกสูบ

$d =$ เส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกสูบ

$r =$ ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเพลลาหมุนถึง
ศูนย์กลางกระบอกสูบ

$\theta =$ มุมของ Swash-plate

**2.2 ระบบการเคลื่อนที่ของแผ่นเอียง
(Swash-plate motion system)** ขนาดมุมของ
Swash-plate เกิดขึ้นจากพลังงาน ของไหลที่อยู่ในรูป
ความดันเคลื่อนที่ไปใน Actuator ที่เป็นตัวขับ Swash-
plate ทำให้เกิดแรงผลักดันจนเกิดมุมเอียงของ Swash-
plate ซึ่งจะมีผลต่อปริมาตรการกระจัดของลูกสูบ
Andreas Kugi[2] ได้อธิบายถึงเคลื่อนที่ของ Swash-
plate เมื่อมีพลังงานของไหลเข้าไปที่ Actuator A ทำ
ให้เกิดแรงที่ชนะแรงต้านการเคลื่อนที่ ทำให้ Swash-
plate เกิดการเคลื่อนที่เชิงมุม

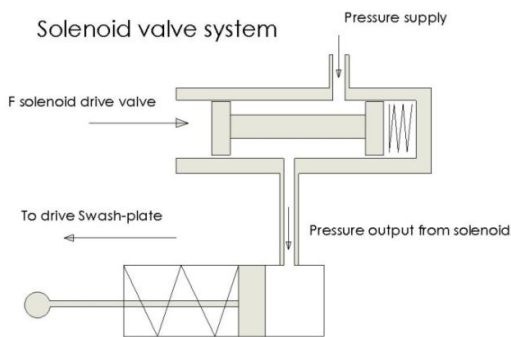


**รูปที่ 3. รูปภาพอธิบายการเคลื่อนที่ของ Swash-
plate**

ซึ่งจากตัวแปรข้างต้นเป็นการยากที่จะทราบ
ค่าตัวแปรต่างๆเนื่องจากค่าตัวแปรบางตัวอยู่ภายใน
อุปกรณ์ ยากแก่การวัด เช่น โมเมนต์เฉื่อยของ
Swash-plate และ เพลลา การตัดตัวแปรหรือหาแนว
ทางการชดเชยตัวแปรที่ไม่ทราบค่า จึงอาจเป็น
แนวทางที่ดีกว่าในการออกแบบ แบบจำลองทาง
คณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฮดรอลิกส์

จากรูปที่ (3) จะเห็นได้ว่า ค่าตัวแปรที่จะ
ป้อนเข้าไปในระบบการเคลื่อนที่ของ Swash-plate คือ
 P_A ซึ่งหากต้องการที่จะควบคุมการเคลื่อนที่ของ
Swash-plate ต้องควบคุมที่ ความดันขาเข้า Actuator
A โดยความดันที่เข้าไปใน Actuator A นั้น สามารถ
ควบคุมผ่าน Solenoid valve

3.3 การทำงานของ Solenoid valve และ สัญญาณควบคุม PWM (Pulse-width modulation) Solenoid valve เป็นวาล์วที่มีการใช้งานกันแพร่หลายมักใช้งานกับระบบ ไฮดรอลิกส์ และ นิวเมติก ทำงานโดยการป้อนความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เพียงพอให้กับวาล์ว วาล์วจึงจะทำงาน การทำงานจะทำงานในลักษณะเปิดสุด เมื่อไม่มีสัญญาณไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์เพียงพอวาล์วจะไม่ทำงาน จะเป็นงานปิดสุดเช่นกัน วาล์วชนิดนี้จึงมีการทำงานเพียงเปิดสุดและปิดสุดเท่านั้น (Max-Min) ในระบบของมอเตอร์ไฮดรอลิกส์แบบปริมาตรการกระจัด 2 ตำแหน่ง Solenoid valve จะเป็นตัวควบคุมการป้อนพลังงานของไหลเข้าไปสู่ Actuator A ซึ่งจะเป็นแรงที่ใช้ในการผลักให้เกิดมุมของ Swah-plate จากการลักษณะการทำงานของ Solenoid valve ที่มีลักษณะการทำงานเพียง 2 ตำแหน่งคือเปิดสุดกับปิดสุดเท่านั้น ดังนั้นจึงทำให้เกิดแรงดันที่ Actuator A สูงสุดและต่ำสุดด้วย ซึ่งจะส่งผลถึงมุมของ Swash-plate และ ปริมาตรการกระจัดของลูกสูบให้มีเพียง 2 ตำแหน่งเท่านั้น (Max-Min) จึงเป็นที่มาของมอเตอร์ไฮดรอลิกส์แบบปริมาตรการกระจัด 2 ตำแหน่ง



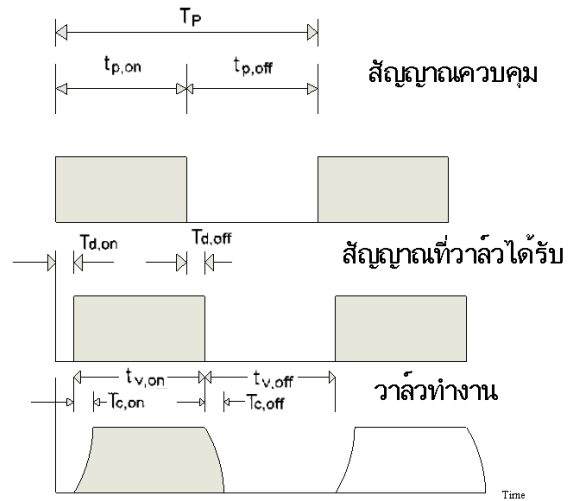
รูปที่ 4. อธิบายลักษณะการทำงานของ Solenoid valve

สัญญาณ PWM (Pulse-width modulation) เป็นสัญญาณควบคุมชนิดหนึ่งทางไฟฟ้า จะเป็นคำสั่งที่มีลักษณะการสั่งให้ทำงานเป็นช่วงๆ มีการส่งสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงสุดกับต่ำสุดเพื่อกระตุ้นการทำงานเป็นช่วงๆ การทำงานของสัญญาณลักษณะนี้จึงเหมาะกับการนำไปใช้ควบคุมวาล์วที่มี

ลักษณะการทำงานแบบเปิด-ปิด(On-Off) โดยทั่วไปสัญญาณ PWM จะใช้ความกว้างของ Pulse มาเป็นตัวกำหนดช่วงการทำงาน ซึ่งสัญญาณ PWM จะประกอบไปด้วยตัวแปร

$$\tau_v = \text{Duty ratio}$$

$$T_p = \text{Pulse period}$$



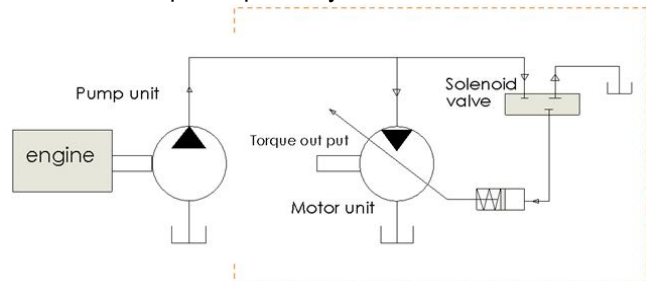
รูปที่ 5. แสดงลักษณะการทำงานของสัญญาณ PWM และแสดงถึงความล่าช้าของระบบ

ซึ่งจากรูปที่ (5) จะเห็นได้ว่าการส่งและรับสัญญาณ และการที่วาล์วเริ่มทำงานจะมีความล่าช้าจึงต้องมีการชดเชยในแบบจำลองเพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ใกล้เคียงระบบจริงที่สุด

3.แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากส่วนประกอบหลักที่จะมาอธิบายพฤติกรรมการทำงานของมอเตอร์ไฮดรอลิกส์ประเภทปริมาตรการกระจัดของลูกสูบ 2 ตำแหน่งทั้งหมด 3 ส่วนคือ

1. Solenoid valve system
2. Swash-plate motion system
3. Torque output of hydraulic motor



รูปที่ 6. ระบบที่ใช้วิเคราะห์แบบจำลอง

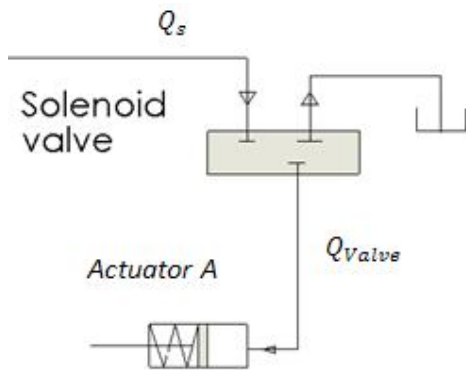
เมื่อกำหนดความดันที่มาจากปั๊มเข้าสู่มอเตอร์คังที่
และพิจารณาเฉพาะตัวมอเตอร์ไฮดรอลิกส์
วิเคราะห์สมมูล Flow เมื่อ Flow จาก ปั๊ม เข้าสู่
มอเตอร์ไฮดรอลิกส์

$$Q_P = Q_m + Q_{Valve} \quad (3)$$

โดยที่ $Q_P = Flow$ ของปั๊ม

$Q_m = Flow$ ที่เข้าสู่กระบอกสูบที่ติดกับเพลาชับ

$Q_{Valve} = Flow$ ที่เข้าสู่ Solenoid valve



รูปที่ 7. แสดงทิศทางการไหลของ Solenoid valve
พิจารณาที่ Solenoid valve เมื่อวาล์วเปิด (Valve
opening)

$$Q_{on} = C_D A_{(t)} \sqrt{2/\rho} \sqrt{P_s - P_r} \quad (4)$$

โดยที่ $Q_{on} = Flow$ ที่วาล์วเปิด

$C_D = discharge\ coefficient$

$P_s = ความดัน\ Supply$

$P_r = ความดัน\ ที่\ เพิ่มขึ้น\ ใน\ Actuator\ A$

ซึ่งจากรูปที่ (5) การทำงานของวาล์วจะมีความล่าช้า
จากสัญญาณที่วาล์วได้รับ ซึ่งสามารถชดเชยโดย
กำหนดเวลาความล่าช้าของวาล์ว (T_c) ซึ่งสามารถ
เขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$A_t = A_{valve} (1 - e^{-t/T_c}) \quad (5)$$

โดยที่ $A_{valve} = พื้นที่\ หน้า\ ตัด\ ของ\ วาล์ว$

เมื่อวาล์วเปิด Flow ของของไหลจะไหลเข้าสู่
Actuator A ซึ่งสมมุติให้ความเร็วของปริมาตรการ

เคลื่อนที่ของลูกสูบใน Actuator A มีค่าเท่ากับ Flow ที่
เข้าสู่ Actuator A

$$Q_{displacement} = Q_{on} \quad (7)$$

$$A \dot{x} = C_D A_{valve} (1 - e^{-t/T_c}) \sqrt{2/\rho} \sqrt{P_s - P_{r,on}(t)}$$

โดยที่

$\dot{x} = ความเร็ว\ ในการ\ เคลื่อน\ ที่\ ของ\ ลูก\ สูบ\ ใน\ Actuator\ A$

$A = พื้นที่\ หน้า\ ตัด\ ของ\ Actuator\ A$

Integral ทั้ง 2 ของสมการโดยให้ initial condition
ของ \dot{x} จาก 0 ถึง x_r และ $P_{r,on}(t)$ จาก P_{low} ถึง P_s

$$x_{r,on}(t) = \sqrt{2/\rho} \frac{P_s - [\sqrt{P_s - P_{low}} - \frac{C_D A_{valve} \{t - T_{c,on} (1 - e^{-t/T_{c,on}})\}]^2}{2}]}{A}$$

(8)

กำหนดให้

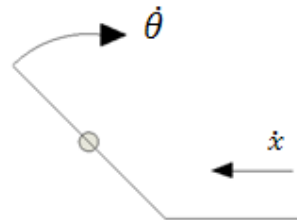
Time modified $t^* = t - T_{c,on} (1 - e^{-t/T_{c,on}})$

และจากความสัมพันธ์ระยะเชิงเส้นกับระยะเชิงมุม

$$x = \theta r$$

โดยที่ $\theta = ระยะ\ เชิง\ มุม\ ของ\ Swash-plate$

$r = ระยะ\ จาก\ จุด\ หมุน\ ถึง\ ปลาย\ Swash-plate$



รูปที่ 8. แสดงความสัมพันธ์การเคลื่อนที่เชิงเส้น
ของลูกสูบกับการเคลื่อนที่เชิงมุมของ Swash-
plate

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแทนค่ากลับไป
สมการ (8) จะได้

$$\theta_{r,on}(t) = \sqrt{2/\rho} \frac{P_s - [\sqrt{P_s - P_{low}} - \frac{C_D A_{valve} t^*}{2}]}{rA}$$

(9)

ซึ่ง จากความสัมพันธ์การทำงานลักษณะ PWM

$$Pulse\ period\ (T_p^*) = t_{v,on}^* - t_{v,off}^*$$

$$\text{Duty ratio } (\tau_v^*) = t_{v,on}^*/T_p^*$$

$$\text{ดังนั้น } t_{v,on}^* = \tau_v^* T_p^*$$

จากสมการที่ (9) จะได้

$$\theta_{r,on}(t_{v,on}) = \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{P_s - [\sqrt{P_s - P_{low}} - \frac{C_D A_{valve} \tau_v^* T_p^*}{2}]^2}{rA}} \quad (10)$$

ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์มุมของ Swash-plate กับตัวแปรของสัญญาณ PWM ในขณะที่เปิดวาล์ว

พิจารณาที่ Solenoid valve เมื่อวาล์วปิด (Valve closing)

เมื่อวาล์วปิดลูกสูบจะดันกลับ Swash-plate ก็เคลื่อนที่กลับเช่นกัน น้ำมันไฮดรอลิกที่อยู่ใน Actuator A จะไหลกลับผ่าน Solenoid valve ไปสู่แทงค์ ซึ่งจะสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ว่า

$$Q_{off} = C_D A_{valve} (1 - e^{-t/\tau_c}) \sqrt{\frac{2}{\rho} \sqrt{P_f - P_t}}$$

โดยที่ Q_{off} = Flow ที่วาล์วปิด

P_f = ความดันที่ลดลงในกระบอกสูบ

P_t = ความดันที่แทงค์

ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์การเคลื่อนที่ของลูกสูบกับ Flow

$$Q_{displacement} = Q_{off}$$

$$-A\dot{x} = C_D A_t \sqrt{\frac{2}{\rho} \sqrt{P_{f,off}(t) - P_t}} \quad (11)$$

ทำนองเดียวกัน Intrigral โดย ให้ initial condition

$P_{f,off}$ จาก P_t ถึง P_h กำหนดให้ความดันแทงค์ $P_t = 0$ จะได้สมการ

$$x_f(t) = -\sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{[\sqrt{P_h} - \frac{C_D A_{valve} t^*}{2}]^2}{A}} \quad (12)$$

จากความสัมพันธ์ ความเร็วเชิงเส้นกับความเร็วเชิงมุมของ Swash plate

$$\theta_f(t_{v,off}) = -\sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{[\sqrt{P_h} - \frac{C_D A_{valve} t_{v,off}^*}{2}]^2}{rA}} \quad (13)$$

จากความสัมพันธ์ การทำงาน PWM

$$t_{v,off}^* = t_{v,on}^* - T_p^*$$

$$t_{v,off}^* = \tau_v^* T_p^* - T_p^*$$

เมื่อแทนค่าความสัมพันธ์ลงไป (13)

$$\theta_f(t_{v,off}) = -\sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{[\sqrt{P_h} - \frac{C_D A_{valve} (\tau_v^* T_p^* - T_p^*)}{2}]^2}{rA}} \quad (14)$$

ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ของมุม Swash-plate ที่อยู่ในความสัมพันธ์ของตัวแปร PWM ขณะที่วาล์วปิด

เมื่อกำหนด

$$\theta_r(t_{v,on}) = \theta_h \quad \text{และ} \quad \theta_f(t_{v,off}) = \theta_l$$

สามารถหา มุมเฉลี่ย θ_m จาก $\theta_m = \frac{\theta_h + \theta_l}{2}$

และ สามารถ หา Ripple amplitude ของมุมของ Swash plate ได้จาก $\theta_d = \theta_h - \theta_l$

เมื่อได้ความสัมพันธ์ของมุมของ Swash-plate กับค่า Input ที่อยู่ในความสัมพันธ์ตัวแปรของสัญญาณ PWM จากสมการที่ (1) และ (2) จะทำให้ได้ค่าทอร์คที่ได้จากมอเตอร์ที่อยู่ในความสัมพันธ์กับตัวแปรของสัญญาณ PWM

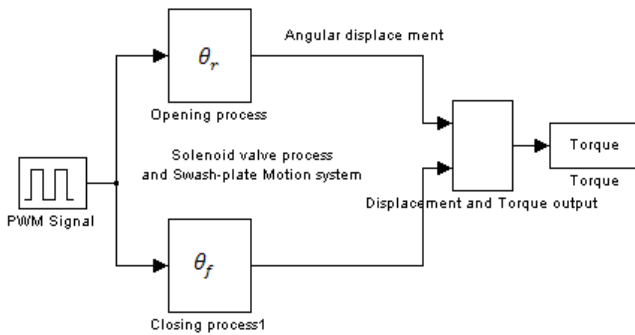
$$D = \frac{\pi z d^2 r \tan \theta}{2}$$

$$T = PD$$

4. การจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ (Simulation) และ วิเคราะห์ผล

จากส่วนประกอบหลักที่จะมาอธิบายพฤติกรรมการทำงานของมอเตอร์ไฮดรอลิกประเภทปริมาตรการกะจัด 2 ตำแหน่งทั้งหมด 3 ส่วนคือ

1. ทอร์กที่ได้จากตัวมอเตอร์ไฮดรอลิกส์ (Torque output of hydraulic motor)
2. ระบบการเคลื่อนที่ของแผ่นเอียง (Swash-plate motion system)
3. ระบบการทำงานของ Solenoid valve และสัญญาณ PWM (Solenoid valve system)



รูปที่ 9. บล็อกไดอะแกรมอธิบายค่าทอร์กที่ได้ของมอเตอร์ไฮดรอลิกส์

เมื่อนำสมการสร้างบล็อกไดอะแกรมเพื่อจำลองการทำงานที่แสดงถึงค่า Input และ Output ของมอเตอร์ไฮดรอลิกส์ได้ดัง รูปที่ 9.

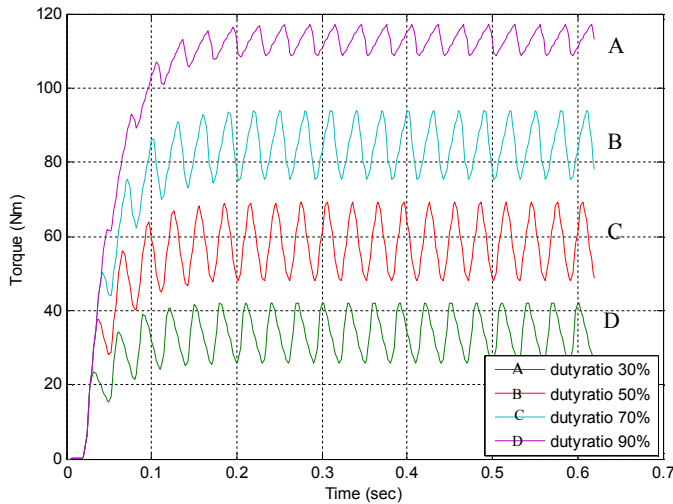
กำหนดให้ค่ามุมของ Swash-plate เคลื่อนที่เชิงมุมอยู่ในช่วง

จากไดอะแกรมใน (รูปที่ 9) ค่า input ที่ป้อนเข้าไปในระบบจะมี 2 ตัวแปรคือความดันที่ป้อนเข้าสู่ระบบและ สัญญาณควบคุมการทำงานของ Solenoid valve (PWM) ในการนำเสนอเทคนิคในการควบคุมทอร์กของตัวมอเตอร์ไฮดรอลิกส์ จะกำหนดให้ความดันที่ป้อนเข้าสู่ Solenoid valve คงที่ ดังนั้นค่าทอร์กที่ได้ จะขึ้นอยู่กับลักษณะของสัญญาณ PWM ที่ป้อนเข้าไป

ในระบบจริงนั้นมีปัจจัยหลายอย่างที่จะทำให้สัญญาณ output มีลักษณะผิดเพี้ยนไปจาก สัญญาณ input เริ่มที่การส่งสัญญาณควบคุม PWM มาที่ระบบ Solenoid valve สัญญาณที่ Solenoid valve ได้รับอาจมีความล่าช้าจากแหล่งกำเนิด และเมื่อ Solenoid valve ได้รับสัญญาณ จะมีช่วงเวลาที่ยืดหยุ่นในการเปิด-ปิดวาล์ว ทำให้ลักษณะของ ความดัน output มีลักษณะแตกต่างจากสัญญาณควบคุมอันเนื่องมาจาก

ความล่าช้าในการทำงาน เมื่อความดัน output จาก Solenoid valve ป้อนเข้าสู่ Swash-plate motion system ความดันของไหลที่ออกมาจาก Solenoid จะเป็นแรงขับให้ Swash-plate เกิดการเคลื่อนที่เชิงมุม ซึ่งในระบบของ Swash-plate motion จะมีการสูญเสียอันเนื่องมาจากแรงต้านการเคลื่อนที่เชิงมุม แรงเสียดทาน และโมเมนต์เฉื่อย ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลให้การตอบสนองของการเกิดมุมของ Swash-plate ล่าช้าลง และเมื่อ Swash-plate เกิดการเคลื่อนที่เชิงมุมจะทำให้เกิดระยะกระจัดของลูกสูบในระบบ Torque output ซึ่ง ระยะกระจัดของลูกสูบจะส่งผลถึงค่าทอร์กที่ได้เมื่อคิดค่าความดันที่เข้าสู่ระบบคงที่ ที่ระบบ Torque output system จะมีการสูญเสียอันเนื่องมาจากสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ ซึ่งส่งผลให้ค่าทอร์ก output ที่ได้ลดลง ซึ่งสามารถชดเชยโดยการเพิ่มค่า duty ratio เพื่อชดเชยค่าทอร์กจากการสูญเสียมอเตอร์ไฮดรอลิกส์เป็นระบบที่ทำงานในสภาวะความดันที่สูงดังนั้นจึงปฏิเสธไม่ได้ว่าจะเกิดของไหลอัดตัวในระบบซึ่งจะมีผลต่อค่าทอร์ก output ของระบบ รวมไปถึงการทำงานในลักษณะเปิด-ปิดของวาล์วภายใต้ความดันที่สูงและอัตราการไหลที่เร็วเมื่อมีการปิดหน้าตัดของท่อ จะทำให้บริเวณหน้าตัดที่ปิดมีความดันสูงกว่าบริเวณอื่นชั่วขณะ และเมื่ออยู่ในสภาวะนี้หากเปิดวาล์วจะทำให้อัตราการไหลสูงขึ้นชั่วขณะแล้วจึงกลับเข้าสู่ปกติซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า lump of fluid ซึ่งจะมีผลต่อค่าทอร์ก เช่นกัน

จากรูปที่ 9. ซึ่งเป็นบล็อกไดอะแกรมอธิบายการทำงานเมื่อป้อนค่าสัญญาณ PWM เข้าไปเป็น input และกำหนดค่าความดันเข้าระบบคงที่ โดยสัญญาณ PWM ที่ส่งเข้าไปนั้น จะให้ค่า duty ratio ที่ป้อนเข้าไปในระบบ 30,50,70,90 % โดย จะให้ค่า Pulse period ที่ป้อนเข้าสู่ระบบคงที่ ที่ 500 ms (2 Hz) ความดันขาเข้าระบบ 280 bar จะได้ผลตอบสนองของค่าทอร์ก output ดังรูปที่ 10.

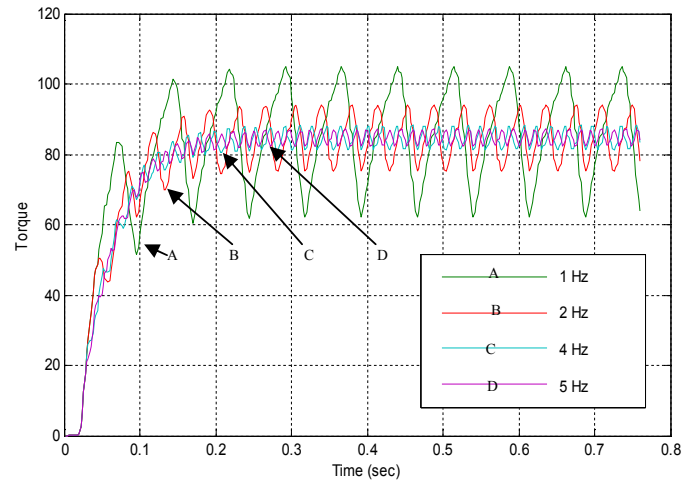


รูปที่ 10. กราฟแสดงผลตอบสนองของทอร์ค output เมื่อป้อนสัญญาณ PWM ที่ duty ratio 30,50,70,90% ที่ pulse period 500ms (2 Hz)

จากกราฟรูปที่ 10. ผลตอบสนองของค่าทอร์ค จาก ระบบ พบว่า ค่าทอร์คที่ได้ จะขึ้นอยู่กับค่า duty ratio โดยยิ่งกำหนดช่วงในการทำงานมากขึ้น (duty ratio) ค่าทอร์คที่ได้จะสูงขึ้นตาม duty ratioซึ่งจะ สามารถนำ ความสัมพันธ์ไปสร้างสัญญาณควบคุมในลักษณะ PWM เพื่อให้ได้ค่าทอร์คตามที่ต้องการ

ลักษณะการตอบสนองของสัญญาณ ทอร์ค output จากระบบมีความล่าช้าอันเนื่องจากหลายปัจจัยที่ทำให้ ระบบเกิดความล่าช้าดังที่กล่าวมาข้างต้น

เมื่อทำการป้อนค่าสัญญาณ PWM เข้าไปเป็น input ในระบบเดิม และกำหนดค่าความดันเข้าระบบคงที่ โดยสัญญาณ PWM ที่ส่งเข้าป้อนนั้น จะให้ค่า duty ratio คงที่ ที่ 70 % โดยจะให้ค่า Pulse period ที่ป้อนเข้าสู่ ระบบ 1000,500,250 และ 200 ms (1,2,4,5 Hz) ความดันขาเข้าระบบ 280 bar จะได้ผลตอบสนองของ ค่าทอร์ค output ดังรูปที่ 11.



รูปที่ 11. กราฟแสดงผลตอบสนองของทอร์ค output เมื่อป้อนสัญญาณ PWM ที่ pulse period 1000,500,250 (1,2,4,5 Hz) และ 200 ms โดย duty ratio คงที่70%

จากกราฟ ผลตอบสนองของค่าทอร์ค output จาก ระบบ (แสดงในรูปที่ 11) แสดงให้เห็นว่า ผลต่าง (สูง -ต่ำ) ของค่าทอร์ค output ขึ้นอยู่กับค่า Pulse period ซึ่งยิ่งค่า Pulse period น้อย (ความถี่สูง) จะทำให้ ผลต่างของค่าทอร์ค output ลดลงตามไปด้วย ซึ่งจะ เป็นดีในการนำความสัมพันธ์นี้ไปประยุกต์สัญญาณ ควบคุม PWM ให้ได้ซึ่งค่าทอร์ค output ที่นิ่งและ เสถียรในการทำงาน

5.สรุป

จากผลการจำลองการทำงานของระบบมอเตอร์ไฮดรอลิกส์แบบปริมาตรการกะจัด 2 ตำแหน่ง จะพบว่า ค่าทอร์ค ที่ได้สอดคล้องกับสัญญาณควบคุมการทำงานลักษณะ PWM ได้เป็นอย่างดี โดยเมื่อค่า duty ratio เพิ่มขึ้น จะทำให้ได้ทอร์ค เพิ่มขึ้น และ เมื่อค่า pulse period ลดลง (ความถี่เพิ่มขึ้น) จะทำให้ผลต่างของค่า amplitude ของทอร์ค output ลดลง มีผลทำให้ ค่า ทอร์ค output นิ่งมากขึ้นตามไปด้วย

ในระบบของ Solenoid valve สามารถชดเชยการล่าช้าของสัญญาณในการขับวาล์วโดยการส่งสัญญาณควบคุมในลักษณะล่วงหน้าซึ่งจะช่วยชดเชยความ

ล่าช้าการเปิดวาล์ว ในระบบ Swash-plate motion ที่มีการล่าช้าและการสูญเสียในการเคลื่อนที่เชิงมุม อันเนื่องมาจากแรงเสียดทาน แรงต้าน และโมเมนต์เฉื่อย และ ระบบทอร์ค ที่มีการสูญเสียอันเนื่องมาจากสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ซึ่งส่งผลให้ค่าทอร์ค output ลดลง ซึ่งสามารถชดเชยได้โดยการเพิ่มค่า duty ratio เพื่อชดเชยค่าทอร์คที่สูญเสียไป

ซึ่งจากความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าสัญญาณควบคุมลักษณะ PWM มีความเหมาะสมในการนำมาควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฮดรอลิกส์แบบปริมาตรการกะจัด 2 ตำแหน่ง และง่ายต่อการควบคุม สำหรับแนวทางในการวิจัยต่อไปในอนาคต จากที่กล่าวมาผลตอบสนองจากระบบการทำงานของมอเตอร์ไฮดรอลิกส์มีความล่าช้ากว่าสัญญาณที่สั่งทำงาน ดังนั้น ควรสร้างระบบควบคุมที่มีการทำนายพฤติกรรมล่วงหน้า (Prediction) เพื่อเป็นการชดเชยเวลาที่เกิดจากความล่าช้าของระบบทำให้ระบบมีความไวและเสถียรมากขึ้นต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] Tanaka, H., Araki, K., Ogimura, Y., and Hamamoto, S., 1985, "Electro-Hydraulic Digital Servo-Mechanism by the Pulse Flow Control," *Proc. Int. Symposium on Fluid Control and Measurement*, Tokyo, Japan, pp. 429-434.
- [2] Jeong, HS., Kim, HE., (2002),"Experimental Based Analysis of the Pressure Control Characteristics of an Oil Hydraulic Three-Way On/Off Solenoid Valve Controlled by PWM Signal", Vol.124, March 2002, pp. 196-205.
- [3] Kugi, A., Schlacher, K., Aitzetmuller, H., Hirmann, G.,(2000), " Modeling and simulation of a hydrostatic transmission with variable-displacement pump", MCS 53, (2000), pp. 409-414
- [4] B.Surampudi, "Modeling of Low-Speed Characteristics of a Swash-Plate-Type Axial Piston Hydraulic Motor" Presented at the International

Exposition for Power Transmission and Technical Conference 4-6 April 2000

[5] E.Prasiatewan, Modeling ,Simulation and control of an Earthmoving Vehicle Simulator[Master Thesis in Mechanical Engineering].Urbana-Champaign:University of Illinois at Urbana-Champaign;2001.

[6] Kemmetmuller, W., Fuchshumer, F., Kugi, A., "Nonlinear pressure control of self-supplied variable displacement axial piston pumps" ,CEP 18, (2010) ,pp.84-93