

บทที่ 2

ผลงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการควบคุมสเต็ปมอเตอร์ ทั้ง 3 ชนิด คือ ชนิดวาริเอเบิลลิคต์แดนซ์ ชนิดแม่เหล็กถาวร และชนิดผสม (S.F.Rezeka, N.M.Elsodany and N.A.Maharem, 2010: 50-63) สามารถทำได้ทั้งการควบคุมแบบเปิด และการควบคุมแบบปิด (George Barnard Shaw, 2010) ส่วนการวิเคราะห์เพื่อหาสมรรถนะของผลการตอบสนองของสเต็ปมอเตอร์ สามารถทำได้ทั้งทางทฤษฎี และการทดลอง ดังแสดงในผลงานวิจัยของ Alexandra Morar (2003: 117-122) ที่ได้ทำการศึกษาและนำเสนอเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลอง รวมทั้งการหาผลเฉลย หรือการตอบสนองของแบบจำลองของสเต็ปมอเตอร์ ทั้ง 3 ชนิด ทั้งนี้เพื่อเป็นการทำนายถึงพฤติกรรมแบบพลวัตของสเต็ปมอเตอร์ เมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าอินพุท สำหรับการวิเคราะห์ผลการตอบสนองของสเต็ปมอเตอร์ของงานวิจัยนี้ จะทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทดลอง โดยอาศัยชุดจำลองการทดสอบสเต็ปมอเตอร์ที่จะออกแบบและสร้างขึ้นใหม่ ทั้งนี้เพื่อหาสมรรถนะของผลการตอบสนองของสเต็ปมอเตอร์ โดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ ซึ่งได้แก่ ค่าความเร็ว และความเร่ง ที่ต้องนำไปใช้กำหนดในโปรแกรม Mach3 (Using Mach3 Milling, 2006) ทั้งนี้ก็เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด ที่จะส่งผลให้เครื่องกัดชิ้นงานอัตโนมัติขนาดเล็กมีสมรรถนะในการทำงานที่สูง และเหมาะสมกับขีดความสามารถ รวมทั้งมีลักษณะการทำงานที่ราบเรียบ และสม่ำเสมอ (Mohamed S. Zaky, Ehab M. Ismaeil and Mahmoud M. Khater, 2010: 109-113)

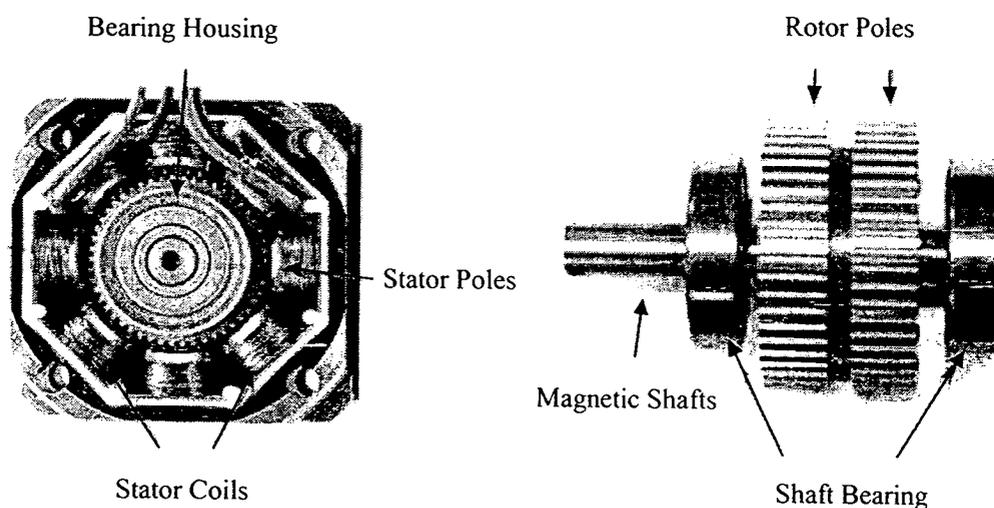
สำหรับทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการออกแบบและสร้างชุดจำลองการทดสอบสเต็ปมอเตอร์ สามารถแสดงได้ดังนี้

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 สเต็ปมอเตอร์ (Stepper Motor)

สเต็ปมอเตอร์หรือมอเตอร์แบบเป็นขั้น เป็นอุปกรณ์เอาต์พุตอย่างหนึ่ง ซึ่งสามารถนำไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์มาทำการควบคุมการทำงานได้สะดวก และเป็นมอเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในงานควบคุมการหมุน ที่ต้องการตำแหน่งและทิศทางที่แน่นอน การทำงาน

ของสเตปป์มอเตอร์จะขับเคลื่อนทีละขั้นหรือสเต็ป ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติแต่ละชนิดของสเตปป์มอเตอร์ตัวนั้นๆ สเต็ปมอเตอร์จะแตกต่างจากมอเตอร์กระแสตรงทั่วไป โดยการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงจะหมุนแบบต่อเนื่องไม่สามารถหมุนเป็นแบบสเต็ปได้ ดังนั้นในการนำไปกำหนดตำแหน่งจึงควบคุมได้ยากกว่า ดังนั้นส่วนใหญ่แล้วจึงนิยมใช้สเตปป์มอเตอร์มาทำการควบคุมโดยใช้วิธีในระบบดิจิทัล เช่นการควบคุมการทำงานของพรินเตอร์ (Printer) พล็อตเตอร์ (Plotter) ดิสก์ไดรฟ์ (Disk drive) เป็นต้น ส่วนสำหรับองค์ประกอบของสเต็ปมอเตอร์สามารถแสดงได้ดังตัวอย่างในภาพประกอบ 2 ซึ่งประกอบด้วย เสื้อตลับลูกปืน (Bearing housing) ขั้วสเตเตอร์ (Stator poles) ขดลวดสเตเตอร์ (Stator coils) ขั้วโรเตอร์ (Rotor poles) เฟลาแม่เหล็ก (Magnetic shafts) และเฟลาตลับลูกปืน (Shaft bearing)



ภาพประกอบ 2 แสดงตัวอย่าง และองค์ประกอบของสเต็ปมอเตอร์
(ที่มา: <http://www.engineersgarage.com/articles/stepper-motors>)

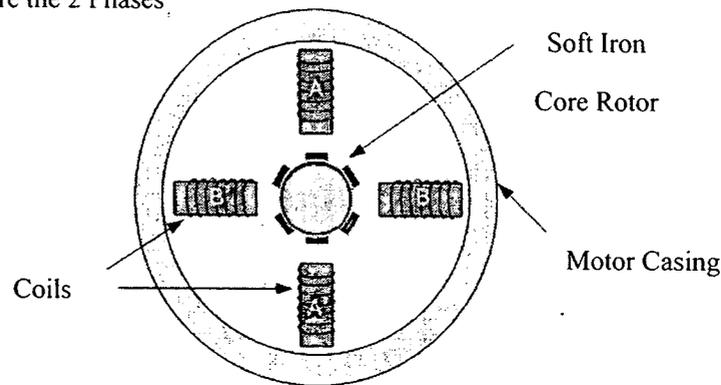
สำหรับชนิดของสเต็ปมอเตอร์ สามารถจำแนกออกเป็นชนิดต่างๆ ได้ดังนี้

2.2.1.1 วารีเอเบิลรีลักแตนซ์ (Variable Reluctance, VR)

สเต็ปมอเตอร์ชนิดนี้มีโครงสร้างของโรเตอร์ (Rotor) แบบหลายฟันทำจากเหล็กอ่อนรูปทรงกระบอก (Soft iron core rotor) ส่วนสเตเตอร์ (Stator) จะมีลวดพัน (Coils) และจะทำเป็นลักษณะของฟันเช่นกัน เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดที่สเตเตอร์จะเกิดเป็นขั้วแม่เหล็กที่ฟันของสเตเตอร์ และเหนี่ยวนำให้ฟันของโรเตอร์เกิดเป็นขั้วแม่เหล็กที่มีขั้วตรงกันข้ามกับสเตเตอร์

ทำให้คังคูดกันเกิดการหมุนของโรเตอร์ขึ้น มอเตอร์ชนิดนี้ถ้าไม่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดบน สเตเตอร์ตัวโรเตอร์จะไม่เกิดแรงคังคูดกับสเตเตอร์ มอเตอร์ชนิดนี้ไม่นิยมนำไปใช้ใน งานอุตสาหกรรมแต่จะถูกนำไปใช้กับงานที่มีขนาดเล็ก เช่น Micro positioning table เป็นต้น เพราะไม่มี ส่วนที่เป็นแม่เหล็กถาวร ดังนั้นในขณะที่ไม่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดที่สเตเตอร์จึงไม่เกิดแรง คังคูด

AA and BB are the 2 Phases

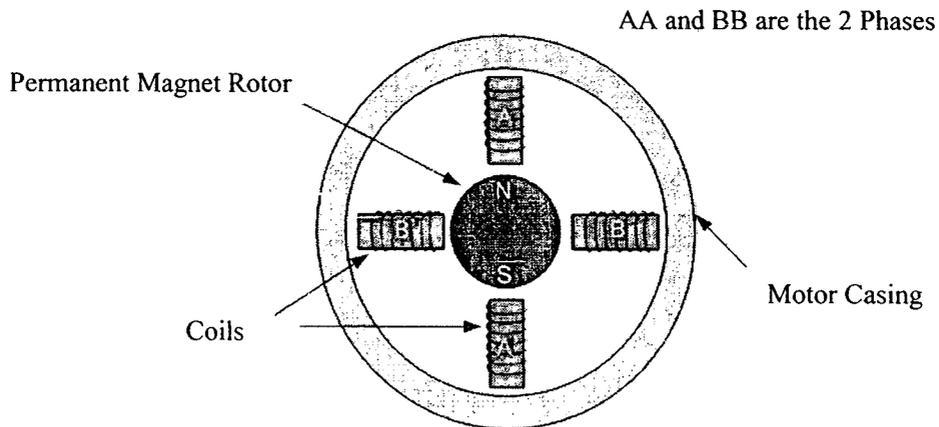


ภาพประกอบ 3 แสดง โครงสร้างสเต็ปมอเตอร์ชนิดวาริเอเบิลรีลักแตนซ์ขนาด 2 เฟส

(ที่มา: <http://www.engineersgarage.com/articles/stepper-motors?page=3>)

2.2.1.2 แบบแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet, PM)

สเต็ปมอเตอร์ชนิดนี้โรเตอร์ทำด้วยแม่เหล็กถาวร (Permanent magnet rotor) รูป ทรงกระบอกเรียบ ไม่มีขั้วแม่เหล็ก ส่วนสเตเตอร์จะมีขดลวดพันและมีลักษณะเป็นฟัน เมื่อจ่าย กระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดที่สเตเตอร์จะเกิดเป็นขั้วแม่เหล็กที่ฟันของสเตเตอร์ และจะคังคูดกับขั้ว ของแม่เหล็กถาวรที่โรเตอร์ ทำให้เกิดการหมุนของโรเตอร์ขึ้น มอเตอร์ชนิดนี้จะมีตั้งแต่ขนาด 2 เฟส ขึ้นไป มอเตอร์ชนิดนี้ไม่นิยมนำไปใช้ใน งานอุตสาหกรรม แต่จะถูกนำไปใช้กับอุปกรณ์ คอมพิวเตอร์ เช่นตัวขับเคลื่อนที่ใช้หมุนเพื่อเลื่อนกระดาษของเครื่องพิมพ์ เป็นต้น เพราะเป็นสเต็ปมอ ตอร์ที่มีความเร็วและแรงบิดค่อนข้างต่ำ นอกจากนี้ด้วยโครงสร้างของมอเตอร์ชนิดนี้ทำให้มุมที่ หมุนไปแต่ละสเต็ปไม่ละเอียดพอ เช่นสเต็ปละ 3.6, 7.5, 15, 18 องศา เป็นต้น มอเตอร์ชนิดนี้ถึงไม่ จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดบนสเตเตอร์ ตัวโรเตอร์จะเกิดแรงคังคูดกับสเตเตอร์ซึ่งเกิดจากอำนาจ ของแม่เหล็กถาวรที่โรเตอร์ทำให้หมุนได้ยาก จำนวนขั้วแม่เหล็กที่โรเตอร์สามารถนับได้จาก จำนวนขั้วแม่เหล็กที่จะเกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดที่สเตเตอร์ชุดใดชุดหนึ่ง

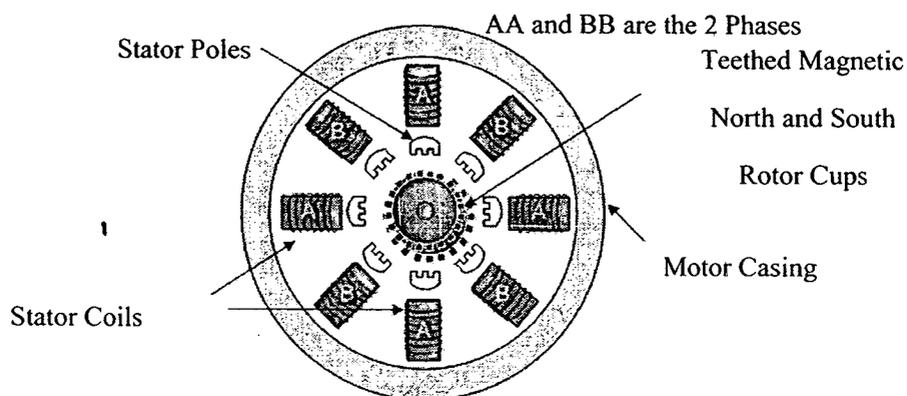


ภาพประกอบ 4 แสดง โครงสร้างของสเต็ปมอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวรขนาด 2 เฟส

(<http://www.engineersgarage.com/articles/stepper-motors?page=2>)

2.2.1.3 แบบผสม (Hybrid, HB)

สเต็ปมอเตอร์ชนิดนี้ ได้นำหลักการทำงานของสเต็ปมอเตอร์ทั้งสองแบบ มา ออกแบบ โดยที่สเตเตอร์จะคล้ายกับแบบ VR ส่วนโรเตอร์จะคล้ายแบบ PM แต่จะทำเป็นฟัน (Teethed magnetic north and south rotor cups) มอเตอร์แบบนี้ นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรม เพราะมี แรงบิดและความละเอียดของ สเต็ปในการหมุนสูง และยังมีค่าความเร็วสูงกว่าสเต็ปมอเตอร์ทั้งสอง แบบที่กล่าวมาแล้ว มอเตอร์ชนิดนี้ โดยปกติจะมีขนาด 2 เฟส ถึง 5 เฟส และในปัจจุบันนี้มอเตอร์ ชนิดนี้ได้มีการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นกว่าเดิมอีก โดยให้ชื่อว่า “Enhanced hybrid”



ภาพประกอบ 5 แสดง โครงสร้างของสเต็ปมอเตอร์ชนิดไฮบริดจ์ ขนาด 2 เฟส

(<http://www.engineersgarage.com/articles/stepper-motors?page=4>)

2.2.2 ชุดควบคุม (Control)

สำหรับชุดควบคุมการทำงานชุดจำลองการทดสอบสเต็ปมอเตอร์แบบผสมเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของสเต็ปมอเตอร์ ประกอบด้วย

2.2.2.1 บอร์ดควบคุมมอเตอร์

สำหรับบอร์ดควบคุมสเต็ปมอเตอร์ ที่ใช้เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนกลไกต่างๆ ของเครื่องกัดชิ้นงานอัตโนมัติ มีหลากหลายชนิดทั้งแบบแยกขับสเต็ปมอเตอร์แต่ละตัว และแบบตู้ควบคุมขับสเต็ปมอเตอร์หลายแกน รวมทั้งมีขนาดของกระแสขับที่แตกต่างกัน ไม่ว่าจะเป็นขนาด 2.5 A หรือขนาด 5 A ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและขนาดของสเต็ปมอเตอร์ที่เลือกใช้งาน

2.2.2.2 โปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องกัดชิ้นงานอัตโนมัติ

สำหรับโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของเครื่องกัดชิ้นงานอัตโนมัติ โดยอาศัยคอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุมมีหลากหลายโปรแกรมเช่น PC CNC software, K Cam, Linux EMC CNC และMach3 เป็นต้น ส่วนสำหรับการทำงานที่จะเลือกโปรแกรมไหนใช้งานก็แล้วแต่ความเหมาะสม โดยการพิจารณาจากลักษณะขอบเขตของงาน รวมทั้งความเหมาะสมอื่นๆ

2.2.2.3 อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณป้อนกลับ (Feedback Device)

สำหรับอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณป้อนกลับสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ

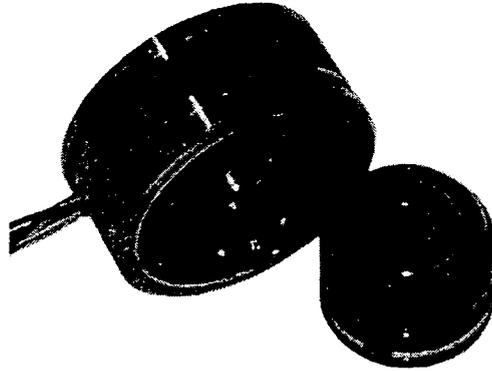
1) อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณป้อนกลับแบบอนาล็อก

เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณที่มักใช้กับระบบควบคุมแบบอนาล็อก แต่หากต้องการใช้กับระบบควบคุมแบบดิจิทัลจำเป็นจะต้องใช้วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล ทั้งนี้เพื่อให้สามารถนำไปประมวลผลได้ อุปกรณ์แบบนี้ไม่ค่อยเป็นที่นิยมนักเนื่องจากจำเป็นต้องแปลงสัญญาณ ทั้งนี้เพราะระบบควบคุมส่วนใหญ่ในปัจจุบันจะเป็นแบบดิจิทัล อย่างไรก็ตามยังคงมีการใช้งานอุปกรณ์เหล่านี้ในงานบางรูปแบบ อุปกรณ์ป้อนกลับแบบอนาล็อกเหล่านี้ได้แก่

(1) รีโซลเวอร์ (Resolver)

รีโซลเวอร์เป็นเซนเซอร์ชนิดที่มีการใช้งานมากในระบบเซอร์โว เนื่องจากมีความแข็งแรง ทนทานต่อสภาพแวดล้อมอุตสาหกรรมได้ดีเช่น แรงสั่นสะเทือน แรงกระแทก และอุณหภูมิรอบข้าง เป็นต้น รีโซลเวอร์มีลักษณะคล้ายกับหม้อแปลงตัวเล็กๆ โดยโครงสร้างของรีโซลเวอร์จะมีลักษณะคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ 2 ชุด โดยชุดแรกจะเป็นชุดที่รับสัญญาณอ้างอิงหรือสัญญาณกระตุ้นซึ่งมีความถี่สูงในช่วง 2-10 kHz จากคอนโทรลเลอร์เพื่อสร้างแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำเพื่อให้เกิดกระแสไหลไปสร้างสนามแม่เหล็กให้กับขดลวดชุดที่สอง ส่วนชุดที่สองจะ

ประกอบด้วยขดลวดปฐมภูมิที่ติดกับ โรเตอร์ 1 ชุด และมีขดลวดทุติยภูมิ 2 ชุดวางในตำแหน่งที่ทำมุมห่างกัน 90 องศา ซึ่งเรียกว่าขดลวดไซน์ (Sine) และ โคไซน์ (Cosine)

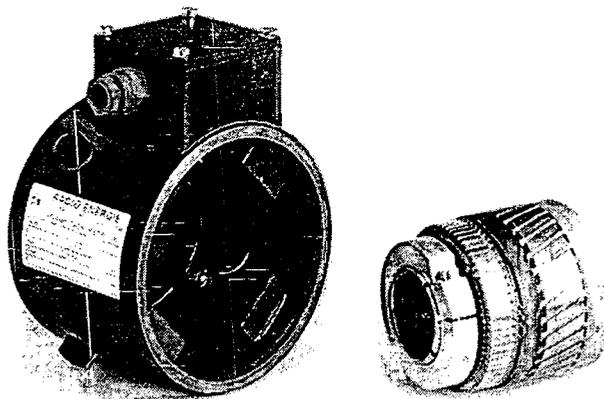


ภาพประกอบ 6 แสดงตัวอย่างของรีโซลเวอร์

(<http://www.micronor-ag.ch/english/Resolver/d-re1511v16d.php?navid=148>)

(2) เทคโคเจนเนอเรเตอร์ (Tachogenerator)

เทคโคเจนเนอเรเตอร์หรือมาตรวัดความเร็ว เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดการหมุนของเพลา ล้อ หรือ โรเตอร์ในมอเตอร์หรือเครื่องจักรต่างๆ สามารถนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ป้อนกลับได้โดยส่วนมากจะใช้ป้อนกลับอัตราเร็วของมอเตอร์ การทำงานใช้หลักการง่ายๆ คือนำคิซีมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรต่อเข้ากับแกนของมอเตอร์ที่ต้องการควบคุม นั่นคือหากมอเตอร์ที่เราต้องการควบคุมเกิดหมุน คิซีมอเตอร์ก็ให้ค่าความต่างศักย์ออกมา เราสามารถนำค่า ความต่างศักย์นี้ไปใช้เป็นสัญญาณป้อนกลับให้กับระบบควบคุมได้ คิซีมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรขนาดเล็กน้อยนำมาใช้เป็นตัวป้อนกลับอัตราเร็วของระบบเซอร์โว โดยจะต้องมีการชดเชยความคลาดเคลื่อนจากอุณหภูมิรวมทั้งใช้วัสดุประเภทเงินเป็นคอมมิวเตเตอร์ (Commutator) เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือเมื่อใช้งานที่อัตราเร็วต่ำๆหรือกระแสต่ำๆ อย่างไรก็ตามสำหรับการใช้งานที่ต้องการความแม่นยำ ความถูกต้อง รวมทั้งการใช้น้ำที่รอบสูงๆ นิยมใช้เทคโคเจนเนอเรเตอร์สำเร็จรูปมาตรฐานแทนการใช้คิซีมอเตอร์ ดังแสดงตัวอย่างในภาพประกอบ 7

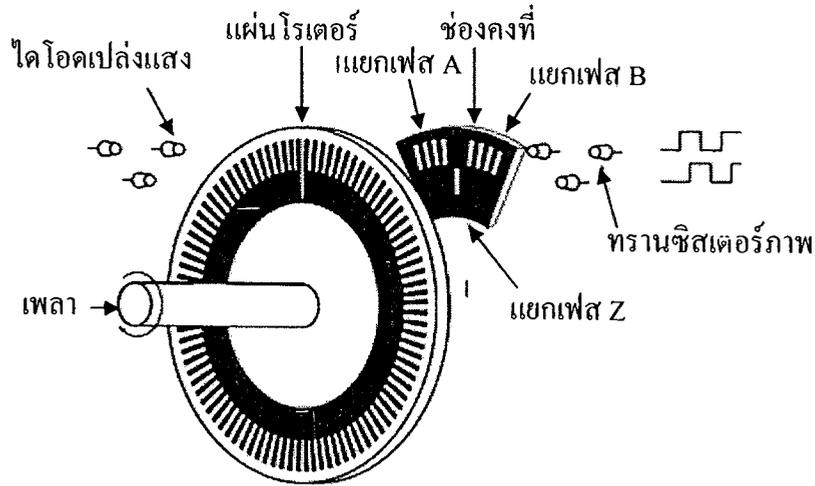


ภาพประกอบ 7 แสดงตัวอย่างของเทคโนโลยีเจนเนอเรเตอร์

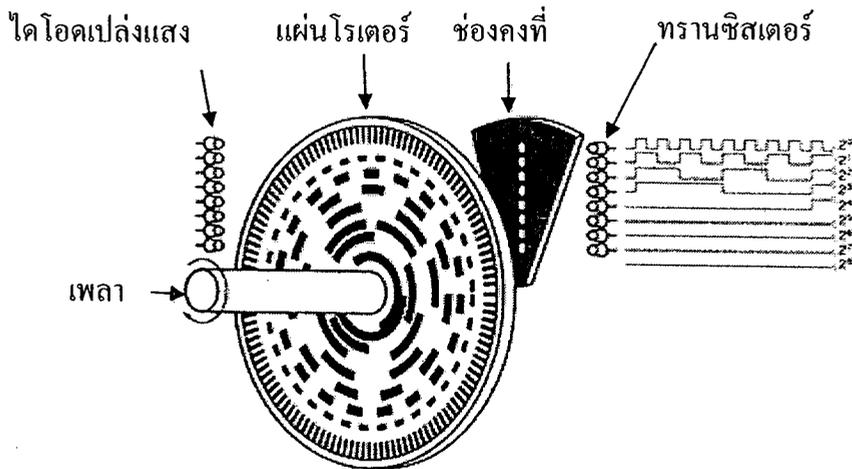
(<http://www.transdrive.co.uk/tachogenerators/industrial-tachogenerators/rdc30.asp>)

2) อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณป้อนกลับแบบดิจิทัล

อุปกรณ์แบบนี้จะป้อนสัญญาณป้อนกลับที่มีค่าแบบดิจิทัล โดยอาจอยู่ในรูปแบบของสัญญาณต่างๆเช่น คลื่นรูปสี่เหลี่ยม (Square wave) คลื่นรูปไซน์ (Sine wave) หรือค่าตำแหน่ง แต่หากผ่านการถอดรหัสแล้วค่าป้อนกลับจะเป็นเลขจำนวนเต็มที่แน่นอน อุปกรณ์ป้อนกลับแบบดิจิทัลชนิดนี้ก็ได้แก่ เอ็นโคเดอร์ (Encoder) เอนโคเดอร์เป็นอุปกรณ์เซนเซอร์ที่มีประโยชน์ในงานอุตสาหกรรมอย่างมาก ปกติแล้วจะใช้ในการวัดระยะทาง ปริมาตร ความเร็ว หรือความถี่ เป็นต้น ซึ่งขึ้นอยู่กับภารกิจและการประยุกต์ใช้งาน สำหรับหลักการทำงานของเอนโคเดอร์ทางไฟฟ้า และทางแม่เหล็กจะคล้ายกับเอนโคเดอร์ทางแสง เอนโคเดอร์ทางไฟฟ้า (หรือเอนโคเดอร์แบบสัมผัส) ทำงานโดยการสัมผัสกันระหว่างแปรงกับหน้าการรหัสซึ่งทำจากตัวนำ อย่างไรก็ตามสำหรับเอนโคเดอร์ที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางที่สุดคือ เอนโคเดอร์ทางแสง ซึ่งสามารถแบ่งตามประเภทการใช้งานได้เป็น 2 แบบคือ เอนโคเดอร์แบบเพิ่มค่า (Incremental encoder) และเอนโคเดอร์แบบสมบูรณ์ (Absolute encoder)



ภาพประกอบ 8 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของเอนโคเดอร์แบบเพิ่มค่า
 (<http://www.tamagawa-seiki.com/english/encoder/>)



ภาพประกอบ 9 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของเอนโคเดอร์แบบสมบูรณ์
 (<http://www.tamagawa-seiki.com/english/encoder/>)

2.2.3 ชิ้นงานที่ทำหน้าที่สร้างโหลดให้กับสเต็ปมอเตอร์

สำหรับการทดสอบเพื่อหาสมรรถนะของสเต็ปมอเตอร์แบบผสมในครั้งนี้อยู่อาศัยชุดจำลองที่ประกอบด้วยสเต็ปมอเตอร์แบบผสม เทคโคเจนเนอเรเตอร์ และตัวจับยึด (Coupling) ซึ่งในการทดสอบจำเป็นต้องสร้างภาระงานหรือโหลดที่สเต็ปมอเตอร์ต้องได้รับ ทั้งนี้เพื่อให้สอดคล้องกับกับสภาวะการทำงานของเครื่องกักชิ้นงานอัตโนมัติ ในขณะที่มีการกักชิ้นงานจริง กล่าวคือ สเต็ปมอเตอร์จะมีการทำงานหรือโหลดที่เพิ่มขึ้นในขณะที่เครื่องกักมีการกักชิ้นงานจริง ดังนั้นจึงมี

การออกแบบ และสร้างชิ้นงานที่ทำหน้าที่เป็นตัวเพิ่มโหลคให้กับสเต็ปมอเตอร์ โดยมีค่าแรงบิดที่ต้องพิจารณาเพื่อออกแบบชิ้นงานดังกล่าว ดังต่อไปนี้

2.2.3.1 แรงบิดที่สเต็ปมอเตอร์ใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องกักชิ้นงานอัตโนมัติ

สำหรับแรงบิดที่สเต็ปมอเตอร์ต้องใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องกักชิ้นงานอัตโนมัติ

ในแต่แนวแกน สามารถแสดงได้ดังในสมการในด้านล่าง

$$T_{i,i} = T_{\text{friction}} + (J_{\text{coupling}} + J_{\text{screw}} + J_{\text{reflect}}) \times \alpha \quad (2.1)$$

เมื่อ

$$T_{\text{friction}} = \frac{F_i \times P}{2\pi\eta} \quad (2.2)$$

เมื่อ

$$F_x, F_y = \mu M_i g + M_i a$$

และเมื่อ

$$F_z = M_i g + M_i a$$

$$J_{\text{coupling}} = \frac{M_c}{2} (r_i^2 + r_o^2) \quad (2.3)$$

$$J_{\text{screw}} = \frac{M_b D^2}{8} \quad (2.4)$$

$$J_{\text{reflect}} = M_i \left(\frac{P}{2\pi} \right)^2 \quad (2.5)$$

เมื่อ

$T_{i,i}$ คือแรงบิดรวมที่สเต็ปมอเตอร์ต้องใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องกักชิ้นงานอัตโนมัติ
ในแนวแกน i

F_i คือแรงในแนวแกน i

T_{friction} คือแรงบิดที่ต้องเอาชนะแรงเสียดทาน

J_{coupling} คือแรงเฉื่อยของตัวจับยึด

J_{screw} คือแรงเฉื่อยของบอลสกรู

J_{reflect} คือแรงเฉื่อยเนื่องจากมวล

M_i	คือมวลที่สเต็ปมอเตอร์ต้องขับเคลื่อนในแนวแกน i
M_b	คือมวลที่ของบอลสกรู
M_c	คือมวลที่ของตัวจับยึด
r_i	คือรัศมีวงในของตัวจับยึด
r_o	คือรัศมีวงนอกของตัวจับยึด
α	คือค่าความเร่งเชิงมุม (rad/s^2)
a	คือค่าความเร่งเชิงเส้น (m/s^2)
μ	คือค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของบอลสกรู
η	คือค่าประสิทธิภาพของบอลสกรู
P	คือระยะพิทช์ของบอลสกรู
D	คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของบอลสกรู

2.2.3.2 แรงบิดที่สเต็ปมอเตอร์ใช้ในการขับเคลื่อนเทคโคเจนเนอเรเตอร์

สำหรับแรงบิดที่สเต็ปมอเตอร์ต้องใช้ในการขับเคลื่อนเทคโคเจนเนอเรเตอร์ในชุดจำลอง สามารถแสดงได้ดังในสมการที่ตามมา

$$T_2 = (J_{\text{coupling}} + J_{\text{tacho}}) \times \alpha \quad (2.6)$$

เมื่อ

T_2	คือแรงบิดรวมที่สเต็ปมอเตอร์ต้องใช้ในการขับเคลื่อนเทคโคเจนเนอเรเตอร์
J_{tacho}	คือแรงเฉื่อยของเทคโคเจนเนอเรเตอร์

2.2.3.3 ขนาดชิ้นงานที่ทำหน้าที่สร้างโหลดให้กับชุดจำลอง

สำหรับชิ้นงานที่ทำหน้าที่สร้างโหลดให้กับชุดจำลอง จะสามารถคำนวณหามวลได้ดังแสดงในสมการด้านล่างคือ

$$M_{o,i} = \frac{2J}{r_o^2 - r_i^2} \quad (2.7)$$

เมื่อ

$$J = \frac{T_1 - T_2}{\alpha} \quad (2.8)$$

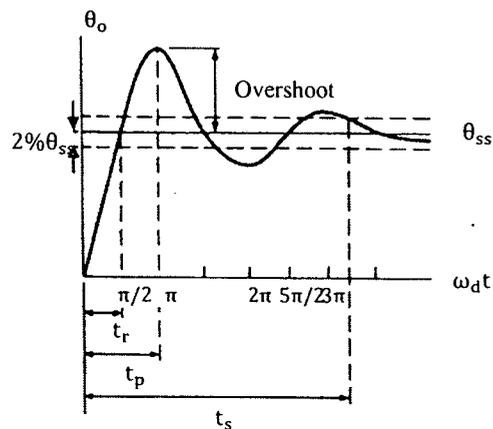
เมื่อ

$M_{o,i}$ คือมวลของชิ้นงานที่ทำหน้าที่สร้างโหลดในแนวแกน i

J คือแรงเฉื่อยของชิ้นงานที่ทำหน้าที่สร้างโหลด

2.2.4 การตรวจวัดเพื่อหาสมรรถนะของสเต็ปมอเตอร์

สำหรับการตรวจวัดเพื่อหาสมรรถนะของสเต็ปมอเตอร์ สามารถพิจารณาได้จากผลการตอบสนองของสเต็ปมอเตอร์ ดังแสดงในภาพประกอบ 10



ภาพประกอบ 10 แสดงการตอบสนองของระบบอันดับสองที่ได้รับอินพุตแบบขั้นบันได และเป็นระบบแบบ Under damped (W. Bolton, *Control Engineering*, 1998: 99)

สำหรับการพิจารณาสมรรถนะของระบบดังกล่าว จะพิจารณาจากค่าต่าง ๆ ดังนี้คือ

2.2.4.1 Rise Time (t_r)

เป็นเวลาที่ระบบใช้ในการตอบสนองจากค่าเริ่มต้น จนกระทั่งมีค่าการตอบสนองเท่ากับการตอบสนองในสภาวะคงตัว โดยค่าระยะเวลาดังกล่าวนี้จะเป็นตัวที่บ่งชี้ว่าระบบดังกล่าวนี้มีการตอบสนองต่อการกระตุ้นหรืออินพุตได้เร็วเพียงใด ซึ่งจากภาพประกอบ 10 พบว่ากราฟการตอบสนองของระบบดังกล่าวจะผ่านหรือมีการตอบสนองผ่านค่าสุดท้ายไป โดยใช้เวลานึ่งในสี่ของคาบการสั่น ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{\pi}{2}$ ดังนั้นเราจึงสามารถนิยาม t_r ได้เป็น

$$t_r = \frac{\pi}{2\omega_d} \quad (2.9)$$

เมื่อ

ω_d คือ Damped oscillation frequency ($\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$)

ω_n คือความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency)

อย่างไรก็ตามสำหรับการนิยามค่า t_r ในบางครั้งอาจจะแตกต่างกันออกไป เช่น ระยะเวลาที่ระบบมีขนาดของการตอบสนองตั้งแต่ 10% ของค่าคงตัว ไปถึงค่า 90% ของค่าคงตัว ซึ่งการกำหนดเช่นนี้อาจเรียกว่า 90% Rise time เป็นต้น

2.2.4.2 Peak Time (t_p)

เป็นเวลาที่ใช้ในการตอบสนองจากค่าเริ่มต้น ถึงค่าการตอบสนองสูงสุดค่าแรก จากภาพประกอบ 10 พบว่าเวลาดังกล่าวนี้จะเท่ากับเวลาที่ใช้ในการแกว่งในครึ่งรอบ ดังนั้นเราจึงนิยาม Peak time เป็น

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_d} \quad (2.10)$$

2.2.4.3 Overshoot

คือค่าความแตกต่างที่มากที่สุดระหว่างค่าการตอบสนองสูงสุด กับค่าการตอบสนองในสภาวะคงตัว โดยค่าดังกล่าวนี้จะเป็นค่าที่บ่งบอกว่าระบบมีการแกว่งตัวออกไปจากค่าสุดท้ายมากน้อยเพียงใด สำหรับค่าดังกล่าวนี้ในบางครั้งจะบอกเป็นร้อยละของค่าที่สภาวะคงตัว ดังแสดงในสมด้านล่าง

$$\text{Overshoot} = \theta_{ss} \exp\left(\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right) \quad (2.11)$$

ถ้าพิจารณาเป็นร้อยละของ θ_{ss} จะได้ว่า

$$\text{Percent overshoot} = \exp\left(\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right) \times 100\% \quad (2.12)$$

จากสมการดังกล่าวนี้พบว่าค่า Overshoot ของระบบ จะขึ้นอยู่กับเฉพาะอัตราส่วนความหน่วงของระบบเท่านั้น ดังนั้นเมื่อเราทราบอัตราส่วนความหน่วงของระบบ

จะสามารถบอกได้ทันทีว่าระบบมีร้อยละของ Overshoot เท่าใด และจากสมการดังกล่าวนี้ยังมีค่า ζ น้อยเท่าใด ร้อยละของ Overshoot ของระบบก็จะมากขึ้นเท่านั้น

2.2.4.4 Oscillation Decay หรือ Decrement

ค่าดังกล่าวนี้จะเป็นตัวบ่งชี้ว่าระบบจะมีการตอบสนองที่ลดลงสู่ค่าคงตัวด้วยความเร็วมากน้อยเพียงใด โดยทั่วไปจะวัดอยู่ในรูปของสัดส่วนการลดลงของ Overshoot ที่เกิดขึ้นติดต่อกัน 2 ครั้งว่าอัตราส่วนนั้นมีค่ามากน้อยเพียงใด หากเราพิจารณาอัตราส่วนของ Overshoot ที่หนึ่ง และ Overshoot ที่สอง ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อเวลา $t = \frac{\pi}{\omega_d}$ และ $t = \frac{2\pi}{\omega_d}$ ตามลำดับคือ

$$\text{First overshoot} = \theta_{ss} \exp\left(\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right) \times 100\%$$

และ

$$\text{Second overshoot} = \theta_{ss} \exp\left(\frac{-3\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right) \times 100\%$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\text{Oscillation decay} = \frac{\text{Second overshoot}}{\text{First overshoot}} = \frac{\theta_{ss} \exp\left(-3\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2}\right)}{\theta_{ss} \exp\left(-\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2}\right)}$$

$$\text{Oscillation decay} = \exp\left(-\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2}\right) \quad (2.13)$$

สำหรับค่า Oscillation decay ดังกล่าวนี้จะเป็นตัวบ่งชี้ว่าระบบมีอัตราการสูญเสียพลังงานรวดเร็วเพียงใด ซึ่งจะเห็นว่าค่าดังกล่าวนี้จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของค่าความหน่วง

2.2.4.5 Setting Time (t_s)

คือระยะเวลาที่ใช้ในการพิจารณาว่าระบบจะเข้าสู่ค่าคงตัวเมื่อใด กล่าวคือ เป็นที่ทราบอยู่แล้วว่ากรณีที่ระบบจะมีการตอบสนองที่เข้าสู่ค่าคงตัวก็ต่อเมื่อ $t \rightarrow \infty$ หรือต้องใช้ระยะเวลาที่นานมาก ดังนั้นจึงได้มีการกำหนด t_s ขึ้นมา เช่น 2% Setting time ซึ่งก็หมายความว่า ระยะเวลาที่ใช้ในการตอบสนองของระบบจากสภาพเริ่มต้นจนกระทั่งการตอบสนองของระบบดังกล่าวมีความแตกต่างจากสภาพคงตัวไม่เกิน 2% ดังนั้นหากพิจารณาจากการตอบสนองของระบบอันสองดังกล่าวคือ

$$\theta_o = e^{-\zeta\omega_n t} (-\theta_{ss} \cos \omega_d t + B_1 \sin \omega_d t) + \theta_{ss}$$

เนื่องจากขนาดของการแกว่งตัว (Amplitude) ของการตอบสนองรอบ ๆ ค่าคงตัว มีค่าเท่ากับ $\theta_o - \theta_{ss}$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\text{ขนาดของการแกว่งตัว} = e^{-\zeta\omega_n t} (-\theta_{ss} \cos \omega_d t + B_1 \sin \omega_d t) \quad (2.14)$$

ถ้าหากกำหนดให้ค่าขนาดของการแกว่งตัวดังกล่าวนี้จะต้องไม่เกิน 2% ของค่าคงตัว หรือ $0.02\theta_{ss}$ และเนื่องจากเราทราบอยู่แล้วว่าขนาดของการแกว่งตัวนี้จะเกิดขึ้นสูงสุดเมื่อ $\omega_d t = \pi$ ซึ่งทำให้ $\cos \omega_d t = 1$ และ $\sin \omega_d t = 0$ ดังนั้นจากสมการที่ 2.14 จะได้ว่า

$$0.02\theta_{ss} = e^{-\zeta\omega_n t_{s,2\%}} (\theta_{ss} \times 1 + 0)$$

หรือ

$$0.02 = e^{-\zeta\omega_n t_{s,2\%}}$$

เมื่อทำการ Take logarithms สมการดังกล่าวจะได้ว่า

$$\ln 0.02 = -\zeta\omega_n t_{s,2\%}$$

จะได้ว่า

$$t_{s,2\%} = \frac{-\ln 0.02}{\omega_n \zeta}$$

หรือจะได้ว่า

$$t_{s,2\%} = \frac{4}{\omega_n \zeta} \quad (2.15)$$

ค่าเวลา Setting time ดังกล่าวพิจารณาที่ 2% ของค่าคงตัว หากเราพิจารณาที่ 5% ของค่าคงตัวจะได้ว่า

$$t_{s,5\%} = \frac{-\ln 0.05}{\omega_n \zeta}$$

หรือ

$$t_{s,5\%} = \frac{3}{\omega_n \zeta} \quad (2.16)$$

2.2.4.6 Periodic Time

สำหรับคาบของการแกว่งนั้นจะสามารถคำนวณได้จากความถี่ของการแกว่ง คือ

$$T = \frac{1}{f}$$

หรือ

$$T = \frac{2\pi}{\omega_d}; \text{ เมื่อ } \omega_d = 2\pi f \quad (2.17)$$

ดังนั้นจึงทำให้สามารถที่จะคำนวณหาจำนวนรอบของการแกว่งตัว (Number of oscillations) ของระบบก่อนที่ระบบจะเข้าสู่ Setting time ได้คือ

$$\text{จำนวนรอบที่แกว่ง} = \frac{\text{Setting time}}{\text{Periodic time}}$$

ซึ่งค่านี้ก็จะขึ้นอยู่กับว่าเรากำหนดคร้อยละของ Setting time เป็นเท่าใด เช่น ถ้ากำหนด 2% Setting time ดังนั้นจะได้ว่า

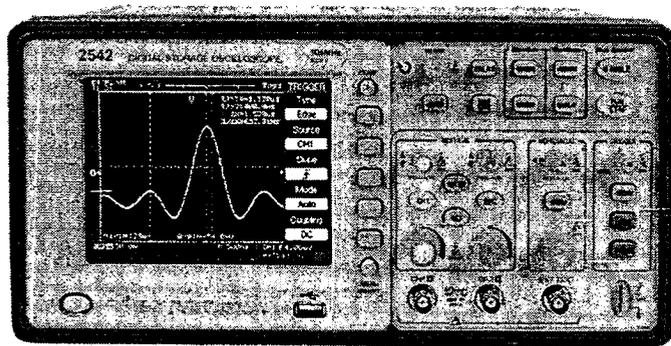
$$\text{จำนวนรอบที่แกว่ง} = \frac{-\ln 0.02}{\omega_n \zeta} \cdot \frac{\omega_d}{2\pi}$$

และจาก $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\text{จำนวนรอบที่แกว่ง} = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{1}{\zeta^2} - 1}$$

2.2.5 ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)

ออสซิลโลสโคป หรือเรียกสั้นๆว่า สโคป (Scope) จัดเป็นเครื่องมือวัดที่มีส่วนสำคัญในการใช้งานและถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางทั้งในด้านไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ออสซิลโลสโคปคือ เครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา โดยสามารถวัดแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเป็นอัตราส่วนเวลา การอ่านค่าปริมาณไฟฟ้าที่แสดงบนจอออสซิลโลสโคป ถ้าเป็นการอ่านความแรง (Amplitude) ของปริมาณไฟฟ้าจะอ่านออกมาเป็นค่าพีค (Peak Value หรือ VP) หรืออ่านออกมาเป็นค่าพีคทูพีค (Peak to Peak Value หรือ VP-P) ถ้าเป็นการอ่านค่าความถี่ (Frequency) ของปริมาณไฟฟ้าจะต้องอ่านออกมาโดยเทียบกับเวลาเป็นวินาที



ภาพประกอบ 11 ตัวอย่างออสซิลโลสโคป รุ่น BK Precision 2542