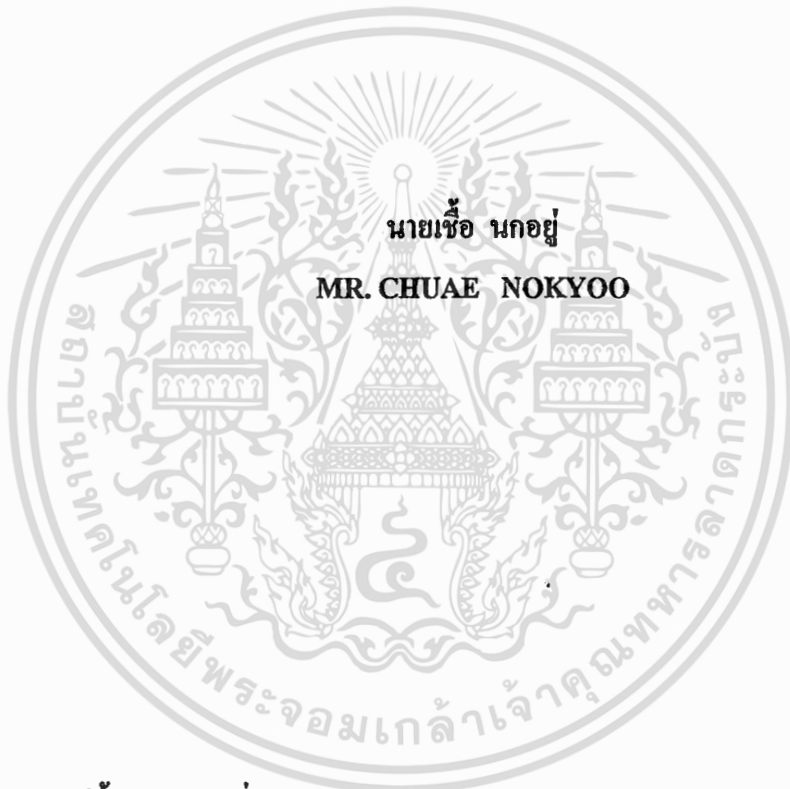


การควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่อัตโนมัติโดยใช้อินดักชันมอเตอร์  
AUTOMATIC POSITION CONTROL WITH INDUCTION MOTOR



นายเชื้อ นกยูง  
MR. CHUAE NOKYOO

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขหม.....

เลขทะเบียน..... 28894

วัน, เดือน, ปี 10 พ.ย. 2540

พ.ศ. 2540

ISBN 974-621-641-3

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

**AUTOMATIC POSITION CONTROL WITH  
INDUCTION MOTOR**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**1997**

**ISBN 974-621-941-3**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่อัตโนมัติโดยใช้อินดักชันมอเตอร์
นักศึกษา	นายเชื้อ นกอยู่
อาจารย์ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ.	2540

บทคัดย่อ

เครื่องจักรกลซีเอ็นซี เป็นเครื่องจักรกลที่มีบทบาทและเป็นที่ยอมรับมากในการนำมาใช้ในขบวนการผลิตทางด้านอุตสาหกรรม ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องจักรกลซีเอ็นซีมีเซอร์โวมอเตอร์เป็นอุปกรณ์ในการขับเคลื่อนชิ้นงานเข้าหาค่าแหน่งได้อย่างแม่นยำ แต่เซอร์โวมอเตอร์และชุดอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์นี้ มีราคาสูงมาก ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอแนวทางการนำอินดักชันมอเตอร์โดยมีอินเวอร์เตอร์ เป็นชุดอุปกรณ์ควบคุมมาทดแทนการใช้เซอร์โวมอเตอร์ โดยในที่นี้จะใช้กับชุดทดสอบกับเครื่องเจียรับ ซึ่งจะทดสอบการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ชุดหินเจียร

**Thesis Title** Automatic Position Control with Induction Motor  
**Student** Mr.Chuae Nokyoo  
**Thesis advisor** Assoc.Prof.Dr.Kobchai Dejhan  
**Level of study** Master of engineering in Electrical Engineering  
**Department** Telecommunication Engineering Faculty Of Engingcering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
**Year** 1997

### Abstract

CNC ( Computer Numerical Control ) is a machine which becomes popular in industrial production process according to the CNC machine use servo motor as a device to lead the work piece into accuracy position. Anyway, the servo motor and its device controller are very expensive. Therefore, this thesis proposes an approach to use induction motor with inverter as a control device for centerless gringer in stead of using servo motor. The testing results concerning about position control of grinding wheel are presented.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ เป็นอย่างสูงที่ได้ให้การประสิทธิ์ประสาทวิชา ให้คำแนะนำในเรื่องต่างๆ และให้คำปรึกษาในเรื่องต่างๆ แก่ผู้เขียน ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบทุกท่านที่ได้สละเวลาอันมีค่า ขอขอบพระคุณ คุณพ่อคุณแม่ และขอบคุณอาจารย์ธีระศักดิ์ ชาญวุฒิชรรม แห่งภาควิชาไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ คุณสุพรรณ นกอยู่ และน้องๆ ที่บริษัทไอคอนเทคโนโลยี ที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณบริษัทกุลธรเคอร์บี้ จำกัด (มหาชน) ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เกี่ยวกับเครื่องจักรกลและอุปกรณ์ในการทำวิจัย ช่วยให้งานวิจัยสำเร็จไปด้วยดี

เชื้อ นกอยู่



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
<b>บทที่</b>	
1. บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
ขอบเขตของการวิจัย.....	2
2. การควบคุมตำแหน่งอัตโนมัติ.....	3
ระบบควบคุมอัตโนมัติ.....	3
ชนิดของระบบควบคุม.....	4
การเลือกใช้ระบบควบคุม.....	8
อุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่ง.....	9
ออฟติคัลเอนโค้ดเดอร์.....	10
อินครีเมนตั้เอนโค้ดเดอร์.....	10
แฮ็ปโซลูต์เอนโค้ดเดอร์.....	13
3. ชนิดและคุณสมบัติของมอเตอร์.....	16
เอซีมอเตอร์.....	17
เอซีอินคักชั่นมอเตอร์.....	17
คุณสมบัติของแรงบิดหมุนของอินคักชั่นมอเตอร์.....	19
คุณสมบัติของกระแสต่อความเร็วของอินคักชั่นมอเตอร์.....	25
ดีซีมอเตอร์เซอร์โวมอเตอร์.....	27
ดีซีมอเตอร์แบบมีขั้วแปร่งถ่าน.....	27

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
ดีซีมอเตอร์แบบ ไม่มีขั้วแปร่งถ่าน.....	33
4. การควบคุมความเร็วมอเตอร์.....	41
การควบคุมความเร็วมอเตอร์ของเซอร์โวมอเตอร์.....	41
การควบคุมความเร็วของอินดักชันมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์.....	43
อินเวอร์เตอร์แบบควบคุมสัดส่วนแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อความถี่.....	45
การควบคุมความเร็วแบบควบคุมเว็คเตอร์.....	47
การควบคุมเว็คเตอร์แบบควบคุมความถี่สลิป.....	50
5. เครื่องเจียรนัยแบบ ไม่ต้องหาศูนย์.....	54
โครงสร้างและหลักในการทำงาน.....	54
ระบบควบคุมตำแหน่ง.....	56
ชุดอุปกรณ์ควบคุมอัตโนมัติ.....	58
การวิเคราะห์ทางการเคลื่อนที่ของชุดหิน.....	58
การทำงานของพีแอลซีและโพจิชัน โมดูล(ไอพี 246).....	59
มอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนถีดิสก์.....	62
6. ผลการทดลองการควบคุมอัตโนมัติ.....	66
การทดลองโดยใช้เซอร์โวมอเตอร์.....	67
การทดลองโดยใช้อินดักชันมอเตอร์.....	72
7. สรุปผลการทดลอง.....	81
บรรณานุกรม.....	84
ภาคผนวก.....	85
ภาคผนวก ก.....	86
ภาคผนวก ข.....	87
ประวัติผู้เขียน.....	94

## สารบัญภาพ

หน้า

1	แสดงระบบควบคุมตำแหน่งด้วยเบรคและคลัทช์.....	4
2	แสดงระบบควบคุมตำแหน่งโดยใช้เสต็ปปีงมอเตอร์.....	5
3	แสดงระบบควบคุมตำแหน่งด้วยเซอร์โวมอเตอร์.....	6
4	บล็อกไดอะแกรมแสดงระบบควบคุมตำแหน่งในภาพที่ 3.....	6
5	แสดงระบบควบคุมตำแหน่งที่ขับเคลื่อนด้วยไฮโดรลิกส์ใช้ร่วมกับ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.....	7
6	หลักการของออปติคัลเอนโค้ดเดอร์.....	10
7	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเอาต์พุทของเอนโค้ดเดอร์.....	11
8	เอาต์พุทจากระบบการใช้โฟโต้ไดโอด.....	12
9	สัญญาณเอาต์พุทรูปสี่เหลี่ยม.....	13
10	แสดงแผ่นดิสก์ของแอ็ปโซกูตเอนโค้ดเดอร์.....	14
11	แสดงแผ่นดิสก์ของอินครีमेंท์ทอลเอนโค้ดเดอร์.....	14
12	แสดงสนามแม่เหล็กหมุนของอินคัซันมอเตอร์.....	17
13	แสดงวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของมอเตอร์แบบอินคัซัน.....	20
14	แสดงวงจรสมมูลโดยประมาณ.....	23
15	แสดงคุณสมบัติของแรงบิดหมุน - ความเร็วของอินคัซันมอเตอร์.....	24
16	แสดงคุณสมบัติของกระแส I <sub>2</sub> ต่อความเร็ว.....	26
17	แสดงชนิดของคิซิมอเตอร์ที่มีอาร์มาเจอร์แบบต่าง ๆ.....	28
18	แสดงการสูญเสียในคิซิมอเตอร์แบบมีแปรงถ่าน.....	29
19	แสดงการเกิดการลัดวงจรที่ขั้วแปรงถ่าน.....	30
20	แสดงวงจรสมมูลของคิซิมอเตอร์แบบมีแปรงถ่าน.....	31
21	แสดงคุณสมบัติของแรงบิดหมุนต่อความเร็วของมอเตอร์เมื่อจ่ายไฟ ให้กับมอเตอร์มีค่าต่างกัน.....	33
22	แสดงภาพตัดขวางของคิซิมอเตอร์ทั้งสองแบบ.....	34
23	แสดงหลักการทำงานพื้นฐานของคิซิมอเตอร์แบบมีแปรงถ่าน.....	34
24	แสดงหลักการพื้นฐานของคิซิมอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่าน.....	35
25	แสดงการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาใช้ควบคุมคิซิมอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่าน.....	38

สารบัญญาดภาพ (ต่อ)

	หน้า
26 แสดงภาพของคิซิมอเตอร์แบบไม่มีแปรงชนิด 3 เฟส.....	38
27 แสดงการเกิดแรงบิดหมุนเมื่อควบคุมการทำงานด้วยทรานซิสเตอร์.....	37
28 แสดงความสัมพันธ์ของแรงบิดหมุนที่ความเร็วต่างกัน.....	40
29 แสดงบล็อกไดอะแกรมของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์.....	42
30 แสดงแรงบิดหมุนของมอเตอร์เมื่อทำการควบคุมความถี่ที่จ่ายให้มอเตอร์.....	43
31 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วมอเตอร์คงที่และใช้มอเตอร์รับภาระตามพิคัดของ มอเตอร์.....	44
32 แสดงคุณสมบัติของแรงบิดหมุน - ความเร็วที่ค่าสลิป $\approx 0$ โดยรักษา $\phi_{ag}$ คงที่และ ใช้มอเตอร์รับภาระคงที่.....	45
33 แสดงบล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบ $V/f$ .....	46
34 แสดงบล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบ $V/f$ โดยมีสัญญาณป้อนกลับ.....	46
35 แสดงบล็อกไดอะแกรมวิธีการควบคุมเว็คเตอร์ทั้งสองวิธี.....	47
36 แสดงวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของอินดักชันมอเตอร์.....	48
37 แสดงเว็คเตอร์ของกระแส $I_m, I_2$ ที่สภาวะต่างกัน.....	50
38 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบควบคุมเว็คเตอร์ โดยวิธีการควบคุมความถี่สลิป.....	51
39 แสดงคุณสมบัติของแรงบิดหมุนของอินเวอร์เตอร์ ณ. ความถี่ต่างกัน.....	52
40 แสดงคุณสมบัติของแรงบิดหมุนต่อความเร็ว ณ. ความเร็วต่างกัน.....	53
41 แสดงหลักการทำงานของเครื่องเจียร์นัยแบบไม่ต้องหาศูนย์.....	55
42 แสดงภาพของเครื่องเจียร์นัยแบบไม่ต้องหาศูนย์.....	55
43 แสดงส่วนของเก็ดสกรู.....	56
44 แสดงภาพเครื่องเจียร์นัยที่ใช้อุปกรณ์ ซีเอ็นซี เป็นเครื่องควบคุม.....	57
45 แสดงไดอะแกรมของเครื่องควบคุมอัตโนมัติ.....	57
46 แสดงการประกอบของ ซีพียู และอินพุท-เอาต์พุทบนแรก.....	59
47 แสดงบล็อกไดอะแกรมของกลุ่มคำสั่งของ PLC ของซีเมนต.....	60
48 แสดงการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่าง PLC กับโพชิชัน โมดูล (FB 164).....	61

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

49	แสดงไคอะแกรมการทำงานของโพซิชั่น โมดูล.....	62
50	แสดงการต่อเซอร์โวมอเตอร์เข้ากับเกียร์ลดความเร็ว.....	63
51	แสดงการต่ออุปกรณ์การควบคุมความเร็วของเซอร์โวมอเตอร์.....	64
52	แสดงการประกอบอินทรีย์เมนต์เอ็น โคคเคอร์เข้ากับเพลาของอินคัซันมอเตอร์ .....	64
53	แสดงการต่อวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีการป้อนกลับความเร็ว.....	65
54	แสดงเอ็นซีโปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง.....	66
55	แสดงการใช้วัฏระยะการเคลื่อนที่ของการทดลอง.....	67
56	แสดงระยะที่เคลื่อนที่ของชุดหิน เมื่อใช้เซอร์โวมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ความเร็วต่ำ 500 รอบต่อนาที.....	68
57	แสดงระยะเคลื่อนที่กลับตำแหน่งเริ่มต้นของชุดหิน เมื่อใช้เซอร์โวมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ความเร็วต่ำ 500 รอบต่อนาที.....	68
58	แสดงระยะที่เคลื่อนที่ของชุดหิน เมื่อใช้เซอร์โวมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ความเร็วต่ำ 200 รอบต่อนาที.....	69
59	แสดงระยะเคลื่อนที่กลับตำแหน่งเริ่มต้นของชุดหิน เมื่อใช้เซอร์โวมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ความเร็วต่ำ 200 รอบต่อนาที.....	69
60	แสดงระยะที่เคลื่อนที่ของชุดหิน เมื่อใช้เซอร์โวมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ความเร็วต่ำ 50 รอบต่อนาที.....	70
61	แสดงระยะเคลื่อนที่กลับตำแหน่งเริ่มต้นของชุดหิน เมื่อใช้เซอร์โวมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ความเร็วต่ำ 50 รอบต่อนาที.....	70
62	แสดงระยะที่เคลื่อนที่ของชุดหิน เมื่อใช้เซอร์โวมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ความเร็วต่ำ 20 รอบต่อนาที.....	71
63	แสดงระยะเคลื่อนที่กลับตำแหน่งเริ่มต้นของชุดหิน เมื่อใช้เซอร์โวมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ความเร็วต่ำ 20 รอบต่อนาที.....	71
64	แสดงระยะที่เคลื่อนที่ของชุดหิน เมื่อใช้อินคัซันมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที.....	73
65	แสดงระยะเคลื่อนที่กลับตำแหน่งเริ่มต้นของชุดหิน เมื่อใช้อินคัซันมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที.....	73

สารบัญญภาพ (ต่อ)

หน้า

66	แสดงระยะที่เคลื่อนที่ของชุดหิน เมื่อใช้อินคักซ์นมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที.....	74
67	แสดงระยะเคลื่อนที่กลับตำแหน่งเริ่มต้นของชุดหิน เมื่อใช้อินคักซ์นมอเตอร์ขับเคลื่อน.....	74
68	แสดงระยะที่เคลื่อนที่ของชุดหิน เมื่อใช้อินคักซ์นมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที.....	75
69	แสดงระยะเคลื่อนที่กลับตำแหน่งเริ่มต้นของชุดหิน เมื่อใช้อินคักซ์นมอเตอร์ขับเคลื่อน.....	75
70	แสดงระยะที่เคลื่อนที่ของชุดหิน เมื่อใช้อินคักซ์นมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ความเร็ว 50 รอบต่อนาที.....	76
71	แสดงระยะเคลื่อนที่กลับตำแหน่งเริ่มต้นของชุดหิน เมื่อใช้อินคักซ์นมอเตอร์ขับเคลื่อน.....	76
72	แสดงระยะที่เคลื่อนที่ของชุดหิน เมื่อใช้อินคักซ์นมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที.....	77
73	แสดงระยะเคลื่อนที่กลับตำแหน่งเริ่มต้นของชุดหิน เมื่อใช้อินคักซ์นมอเตอร์ขับเคลื่อน.....	77
74	แสดงระยะที่เคลื่อนที่ของชุดหิน เมื่อใช้อินคักซ์นมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที.....	78
75	แสดงระยะเคลื่อนที่กลับตำแหน่งเริ่มต้นของชุดหิน เมื่อใช้อินคักซ์นมอเตอร์ขับเคลื่อน.....	78
76	แสดงระยะที่เคลื่อนที่ของชุดหิน เมื่อใช้อินคักซ์นมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ความเร็ว 50 รอบต่อนาที.....	79
77	แสดงระยะเคลื่อนที่กลับตำแหน่งเริ่มต้นของชุดหิน เมื่อใช้อินคักซ์นมอเตอร์ขับเคลื่อน.....	79
78	แสดงระยะที่เคลื่อนที่ของชุดหิน เมื่อใช้อินคักซ์นมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ความเร็ว 20 รอบต่อนาที.....	80

## สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

79 แสดงระยะเคลื่อนที่กลับตำแหน่งเริ่มต้นของชุดหิน เมื่อใช้อินคัลชันมอเตอร์ ขับเคลื่อน.....	80
80 แสดงการกระจายข้อมูลของเซอร์โวมอเตอร์.....	81
81 แสดงการกระจายข้อมูลของอินเวอร์เตอร์แบบ V/F.....	82
82 แสดงการกระจายข้อมูลของอินเวอร์เตอร์แบบเว็คเตอร์คอนโทรล.....	83



# บทที่ 1

## บทนำ

### ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากการประกอบธุรกิจอุตสาหกรรมในปัจจุบันนี้มีสภาพการแข่งขันสูงมาก ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่สามารถแข่งขันได้ และอีกทั้งเป็นที่ต้องการของตลาดจะต้องเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ แต่ในขณะเดียวกันก็ต้องมีราคาไม่แพงนักเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ชนิดเดียวกัน ด้วยเหตุนี้สถานประกอบการโดยส่วนมากจึงต้องพยายามหาวิธีที่จะลดต้นทุนการผลิตลง แต่ในขณะเดียวกันก็ต้องคงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ วิธีการหนึ่งที่จะสามารถ ลดต้นทุนการผลิตลงได้ก็คือ การใช้เครื่องจักรกลที่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความแม่นยำในการทำงาน ซึ่งจะช่วยลดอัตราการสูญเสียของวัตถุดิบในการผลิตได้ เครื่องจักรกลที่มีบทบาทและได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในด้านอุตสาหกรรมการผลิตในปัจจุบันนี้คือ เครื่องจักรกล CNC (Computer Numerical Control) เครื่องจักรซีเอ็นซีนี้มีเซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) เป็นอุปกรณ์ที่ขับเคลื่อนชิ้นงานเข้าหาตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ แต่เซอร์โวมอเตอร์และชุดอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์นั้นมีราคาสูงมาก ในการวิจัยนี้จึงได้เสนอแนวทางในการนำเอามอเตอร์แบบอินดักชัน (Induction Motor) โดยมีอินเวอร์เตอร์ (Inverter) เป็นชุดอุปกรณ์ควบคุม มาทดแทนการใช้เซอร์โวมอเตอร์และชุดอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์ ทั้งนี้เพื่อลดต้นทุนการผลิตลงและลดค่าใช้จ่ายทางด้านต้นทุนการผลิตด้วย

### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติของอินดักชันมอเตอร์ เมื่อมีการขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์แบบฟลักส์เล็กเตอร์
2. เพื่อศึกษาแนวทางและความเป็นไปได้ในการนำเอาอินดักชันมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์มาใช้ในระบบควบคุมตำแหน่งในเครื่องเจียรมัย
3. เพื่อเสนอแนวทางในการนำอินดักชันมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์มาทดแทนการใช้เซอร์โวมอเตอร์และชุดอุปกรณ์ควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ขอบเขตของการทำวิจัย

ขอบเขตของการทำวิจัยนี้ จะเป็นการศึกษาหาคุณสมบัติของอินดักชันมอเตอร์ เมื่อมีการขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์แบบฟลัก์เว็คเตอร์ โดยจะนำมาใช้ในระบบควบคุมตำแหน่งทดแทนการใช้เซอร์โวมอเตอร์และชุดอุปกรณ์ควบคุมในเครื่องเจียรนัย โดยแบ่งเนื้อหาออกเป็นบท ๆ ได้ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย

บทที่ 2 การควบคุมตำแหน่งอัตโนมัติ กล่าวถึง ระบบการควบคุมตำแหน่งอัตโนมัติ อุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่ง

บทที่ 3 ชนิดและคุณสมบัติของมอเตอร์ กล่าวถึง มอเตอร์โดยแบ่งออกเป็น 3 ชนิดใหญ่ ๆ คือ เอชมอเตอร์ ดีซีมอเตอร์ และพลัสมอเตอร์ และคุณสมบัติของมอเตอร์ทั้งสามชนิดนี้

บทที่ 4 การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ กล่าวถึงการควบคุมความเร็วของดีซีมอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่าน การควบคุมความเร็วของอินดักชันมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์ การสรุปเปรียบเทียบผลการควบคุมความเร็วของดีซีมอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่านกับอินดักชันมอเตอร์

บทที่ 5 เครื่องเจียรนัยแบบไม่ต้องการศูนย์ กล่าวถึง หลักการทำงานของระบบควบคุมตำแหน่ง มอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนในระบบควบคุมตำแหน่ง

บทที่ 6 ผลของการทดสอบการควบคุมตำแหน่งอัตโนมัติ กล่าวถึงผลของการทดสอบการควบคุมตำแหน่งด้วยเซอร์โวมอเตอร์ ผลของการทดสอบการควบคุมตำแหน่งด้วยอินดักชันมอเตอร์ และเปรียบเทียบผลของการทดสอบการควบคุมตำแหน่งทั้งสองแบบนี้

บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและแนวทางในการพัฒนา กล่าวสรุปเนื้อหาของงานวิจัยที่ทำมา แนวทางในการพัฒนาตลอดจนปัญหาที่ประสบมาและแนวทางในการแก้ไข

## บทที่ 2

### การควบคุมตำแหน่งอัตโนมัติ

ในปัจจุบันการควบคุมตำแหน่งอัตโนมัตินั้นพบได้โดยทั่วไป ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์สำนักงานในเครื่องจักรที่ใช้อยู่ในอุตสาหกรรม ในห้องปฏิบัติการ รวมทั้งอากาศยาน อุปกรณ์ที่ใช้ในการขับเคลื่อน ย่อมมีความแตกต่างกันตามความเหมาะสมของขนาดอุปกรณ์ ความเที่ยงตรงที่ขอมรับได้ รวมถึงปัจจัยรอบด้านอื่น ๆ เช่น อุณหภูมิ อายุการใช้งาน ฯลฯ

ระบบการควบคุมตำแหน่งนี้มีการพัฒนามานานหลายปี ซึ่งดั้งเดิมนั้นในส่วนขับเคลื่อนจะเป็นพวกมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ หรือไฮดรอลิกแอ็คชูเอทเตอร์ การควบคุมตำแหน่งนี้ ใช้อุปกรณ์ง่าย ๆ เช่น เบรค และคลัทช์ เป็นต้น แต่ด้วยความเจริญก้าวหน้าของเทคโนโลยีทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ และไมโครโปรเซสเซอร์ จึงทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ามามีบทบาทในระบบควบคุมอย่างกว้างขวางอีกทั้งยังมีการพัฒนาออร์รูปแบบใหม่ ๆ เช่น ดีซีเซอร์โวมอเตอร์ สเต็ปปีงมอเตอร์ขึ้นมาใช้ร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ดังกล่าว ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงการเปรียบเทียบผลในระบบควบคุมตำแหน่งของเครื่องจักรในอุตสาหกรรมเมื่อใช้เซอร์โวมอเตอร์ และความเป็นไปได้ในการนำเอาอินดักชันมอเตอร์มาใช้ทดแทนเซอร์โวมอเตอร์

#### ระบบการควบคุมตำแหน่งอัตโนมัติ

ระบบการควบคุมตำแหน่งเป็นระบบที่จะต้องขับเคลื่อนภาระให้ไปหยุดในตำแหน่งที่กำหนดไว้ และจะต้องรักษาดำเนินงานนั้นไว้ให้คงที่จนกว่าจะมีคำสั่งเปลี่ยนแปลงหรือให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งใหม่ ในการเคลื่อนที่ของโหลดไปยังตำแหน่งที่ต้องการจะมีการเคลื่อนที่ 2 ลักษณะ คือ การเคลื่อนที่แบบหมุนภาระไปยังตำแหน่งที่ต้องการในแนววงกลม และ การเคลื่อนที่ให้ภาระเคลื่อนไปเป็นแนวเส้นตรงตามระบบทางที่กำหนดไว้ ซึ่งการเคลื่อนที่ทั้งสองแบบนี้ มักจะมีส่วนประกอบของระบบที่เหมือนกันดังนี้

- ส่วนขับเคลื่อนโหลดทางกล
- ส่วนมอเตอร์ขับเคลื่อน
- ส่วนตรวจวัดตำแหน่ง
- ส่วนควบคุมตำแหน่ง

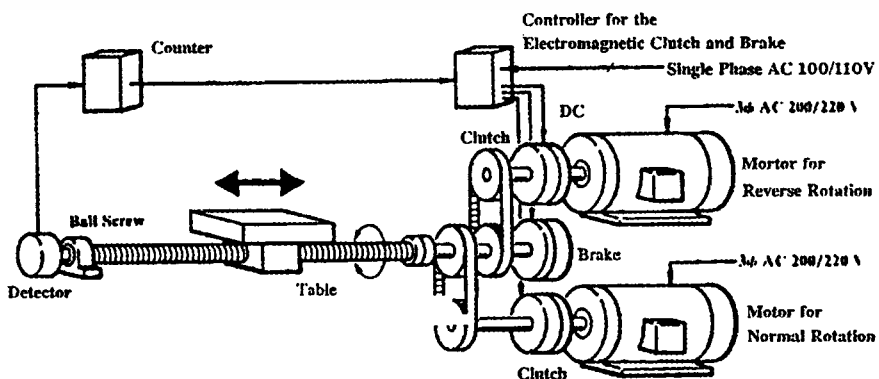
ซึ่งอุปกรณ์แต่ละส่วนจะทำงานสัมพันธ์กัน แต่อาจจะมีรายละเอียดที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะของงาน ขนาดของโหลดทางกลที่จะควบคุมตำแหน่ง และความต้องการความแม่นยำในการควบคุมตำแหน่ง ซึ่งนั่นย่อมหมายถึงราคาของระบบควบคุม 1 ระบบ ว่าจะให้ความคุ้มค่าหรือไม่ ดังนั้นค่าใช้จ่ายของระบบจึงเป็นอีกประเด็นหนึ่งที่ผู้ออกแบบระบบควบคุมจะต้องนำมาประกอบการพิจารณาในการออกแบบด้วย

### ชนิดของระบบควบคุม

ความแม่นยำในระบบควบคุมตำแหน่งนั้นมียู่หลายระดับ ระบบที่ต้องการความแม่นยำสูงจะต้องใช้อุปกรณ์ควบคุมที่มีเทคโนโลยีสูงตามไปด้วย ส่วนระบบที่มีความแม่นยำต่ำจะใช้ อุปกรณ์ควบคุมง่าย ๆ ดังนั้นในการออกแบบระบบควบคุมผู้ออกแบบต้องเลือกใช้ให้เหมาะกับงาน ระบบควบคุมมีหลายแบบต่าง ๆ กันดังนี้

1. การควบคุมตำแหน่งของโต๊ะงานที่ใช้ Ball Screw เป็นอุปกรณ์ขับเคลื่อนทางกล โดยใช้ระบบเบรก และคลัทช์เข้ามาสั่งการให้ Ball Screw หยุดหรือเดินหน้า ถอยหลัง และใช้มอเตอร์ 3 เฟสแบบอินดักชันในการจ่ายไฟฟ้าเข้าโดยตรงเข้าไป ดังภาพที่ 1

ภาพที่ 1



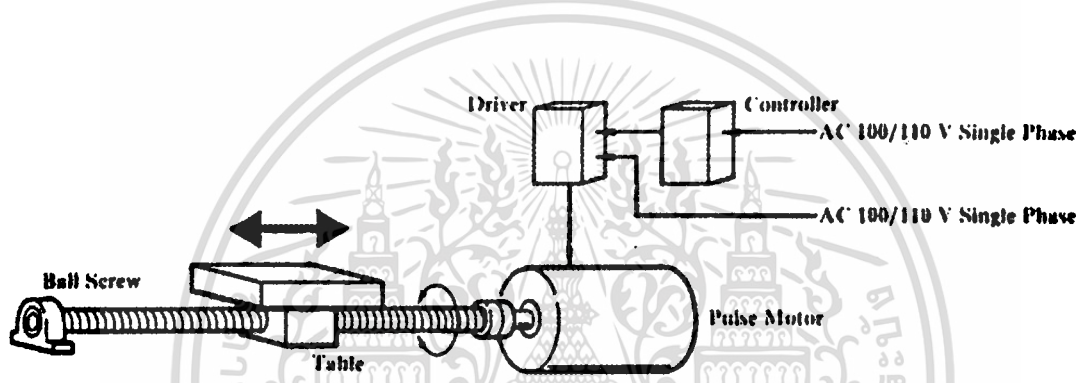
แสดงภาพของระบบควบคุมตำแหน่งด้วยเบรกและคลัทช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบควบคุมแบบนี้เป็นระบบที่ราคาถูก แต่จะสามารถควบคุมความเที่ยงตรงของระบบได้อยู่ในช่วง  $\pm 0.5$  มิลลิเมตร [3]

2. เป็นการควบคุมตำแหน่งของโต๊ะงาน โดยใช้สเต็ปปีงมอเตอร์แบบรูปเปิดเป็นอุปกรณ์ขับเคลื่อนส่วนของ Ball Screw เพื่อพาโต๊ะงานไปตามตำแหน่งที่ต้องการโดยการวัดค่าระยะทางจะคำนวณจากจำนวนสเต็ปของมอเตอร์ที่แปลงค่าองศาต่อสเต็ปและจะแปลงออกมาเป็นระยะทางดังภาพที่ 2

ภาพที่ 2

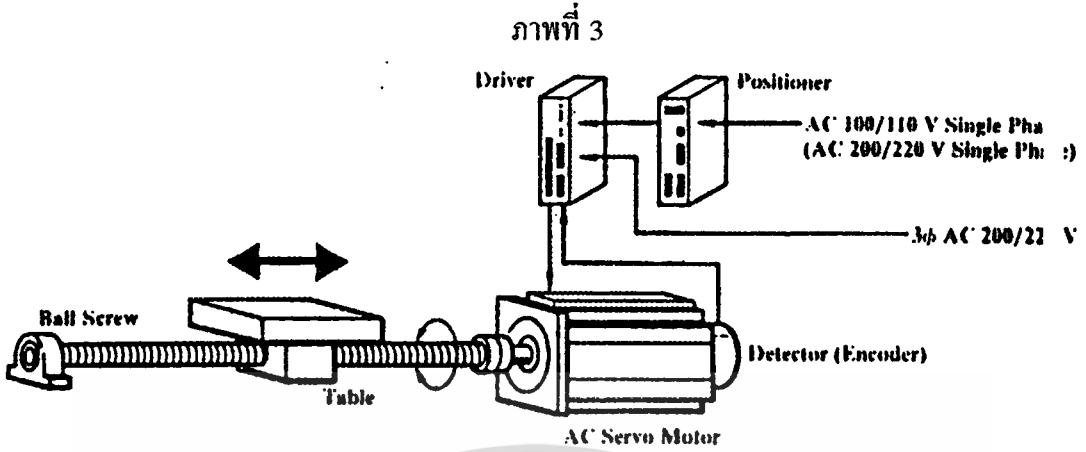


แสดงระบบควบคุมตำแหน่งโดยใช้สเต็ปเปอร์มอเตอร์

ในระบบนี้ให้ค่าความเที่ยงตรงของการควบคุมตำแหน่งอยู่ในค่าระหว่าง  $\pm 0.01$  มิลลิเมตร [3] แต่การเคลื่อนที่ของงานจะไม่แน่นอนโดยจะเป็นขั้น ๆ แม้ว่าได้มีการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ควบคุมมอเตอร์ให้เป็นระบบไมโครสเตปแล้วก็ตาม

3. แบบที่สามเป็นแบบที่จะพบเห็นได้บ่อยครั้งในเครื่องจักรกลอัตโนมัติ (CNC)

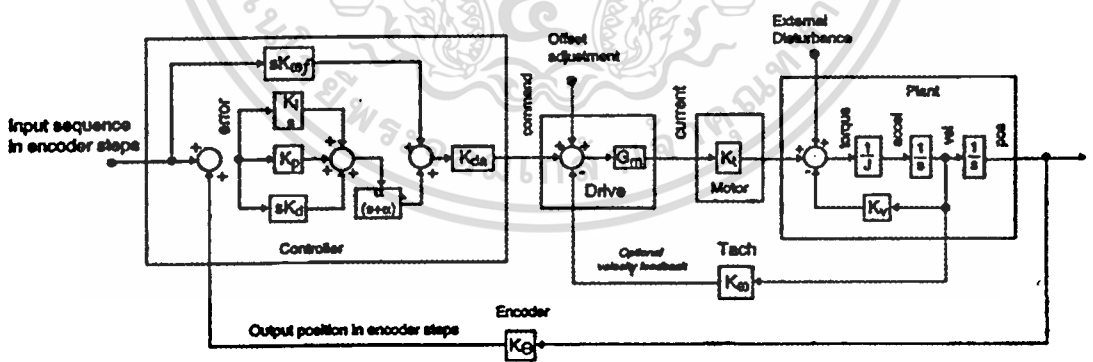
ในส่วนขับเคลื่อนข้อต่อต่าง ๆ ของหุ่นยนต์ หรือในเครื่องจักรที่เป็นส่วนขนถ่าย (สายพานลำเลียง) และอื่น ๆ แบบที่สามนี้อุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าระยะทางจะติดอยู่ที่ท้ายมอเตอร์ สำหรับส่งค่าที่วัดได้ให้กับอุปกรณ์ควบคุมตำแหน่งในขณะที่มอเตอร์ขับ Ball Screw เพื่อทำให้โต๊ะงานเคลื่อนที่ไปตามระยะทางที่กำหนดไว้ อุปกรณ์ที่ใช้วัดระยะทางจะส่งค่าให้อุปกรณ์ควบคุม ซึ่งจะมีการคำนวณค่าความสัมพันธ์ของระยะทางการเคลื่อนที่ต่อการหมุนไป 1 รอบของมอเตอร์ และยังคงบอกให้ทราบถึงทิศทางในการเคลื่อนที่ของโต๊ะงาน ดังภาพที่ 3



แสดงภาพของระบบควบคุมตำแหน่งด้วยเซอร์โวมอเตอร์

ระบบควบคุมตำแหน่งด้วยเซอร์โวมอเตอร์นี้จะให้ค่าความเที่ยงตรงที่สูงมากและสามารถควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ที่มีค่าความผิดพลาดระหว่าง  $\pm 0.01 - 0.001$  มิลลิเมตร [3] ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ควบคุมว่าจะมีความเที่ยงตรงขนาดไหน ระบบนี้เราเรียกว่า ระบบลูปปิด ซึ่งสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมในการทำงานของลูปที่ควบคุมตำแหน่งดังภาพที่ 4

ภาพที่ 4

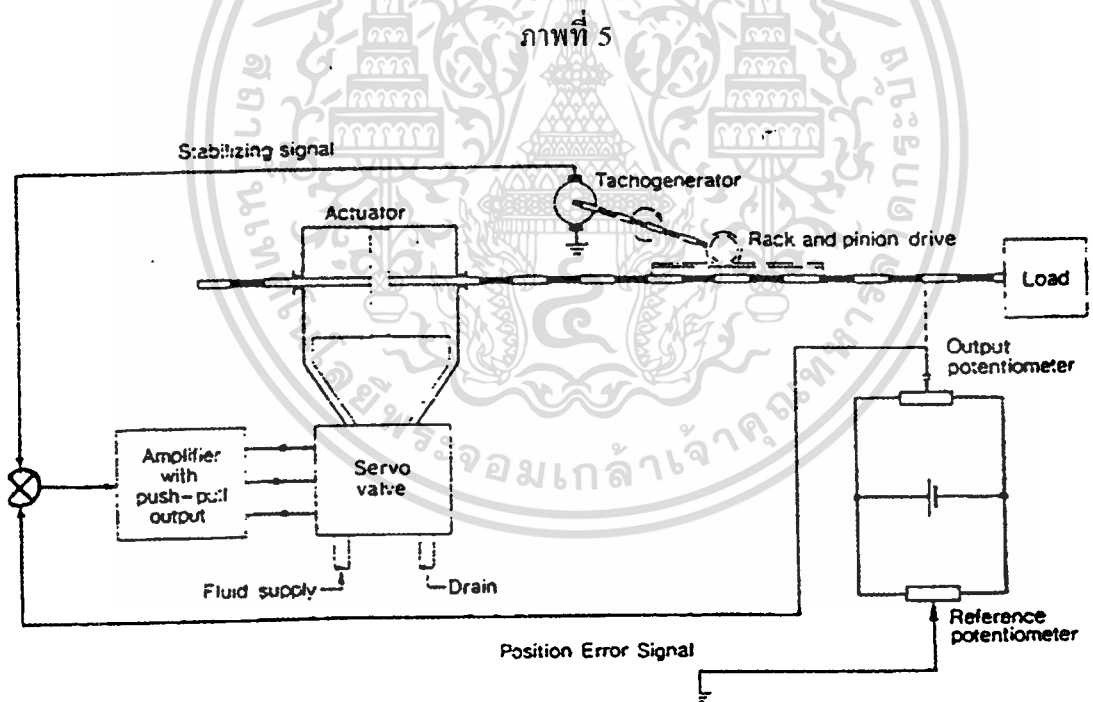


บล็อก ไดอะแกรมแสดงระบบการควบคุมตำแหน่งในภาพที่ 3

จากบล็อกไดอะแกรม แสดงระบบควบคุมตำแหน่งที่มีลูปการควบคุมอยู่ 2 ลูป คือ ลูปของการควบคุมตำแหน่งของขบวนการและลูปการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ โดยลูปการควบคุมตำแหน่งของขบวนการจะเป็นลูปนอกที่มีอุปกรณ์ควบคุมตำแหน่ง ( Position Controller ) ที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะอ่านค่าตำแหน่งจากเอ็นโคเดอร์ (Encoder) ซึ่งเป็นอุปกรณ์วัดระยะทาง แล้วนำมาคำนวณหาตำแหน่งที่ต้องการควบคุม จากนั้นจึงจะส่งสัญญาณให้กับชุดขับเคลื่อนเซอร์โวมอเตอร์ (Servomotor Driver) เพื่อสั่งงานให้เซอร์โวมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วที่ต้องการเพื่อเข้าหาเป้าหมาย ส่วนรูปการควบคุมความเร็วของมอเตอร์นั้น อุปกรณ์ควบคุมจะอ่านค่าความเร็วจากเท็จโฮเจนเนอเรเตอร์ (Tachogenerator)

4. ระบบควบคุมตำแหน่งที่ใช้อุปกรณ์ทางกลเป็นตัวขับเคลื่อนแทนมอเตอร์ที่พบเห็นบ่อยมักจะเป็นระบบไฮดรอลิกส์ โดยที่ระบบไฮดรอลิกส์นี้ มีการควบคุมตำแหน่งของงานด้วยกระบอกสูบ และลูกสูบจะถูกควบคุมตำแหน่งด้วยเซอร์ว็วาล์ว (Servo valve) ซึ่งในส่วนของเซอร์ว็วาล์วนี้จะสามารถควบคุมได้ด้วยสัญญาณไฟฟ้า ดังนั้น เราจึงสามารถควบคุมตำแหน่งโดยใช้ไฮดรอลิกส์เป็นส่วนขับเคลื่อนและใช้อุปกรณ์วัดระยะทางแบบอิเล็กทรอนิกส์รวมกันได้อย่างตัวอย่างในภาพที่ 5



ภาพแสดงระบบควบคุมตำแหน่งที่ขับเคลื่อนด้วยไฮดรอลิกส์  
ใช้ร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

## การเลือกใช้ระบบควบคุม

ในการเปรียบเทียบระบบควบคุมที่เหมือนกัน 2 ระบบว่าระบบไหนจะดีกว่ากัน เราจะต้องศึกษาถึงการตอบสนอง (Response) ของแต่ละระบบแล้วจึงนำมาเปรียบเทียบกัน ระบบที่ให้การตอบสนองที่แม่นยำ ย่อมดีกว่าระบบที่ให้การตอบสนองที่คลาดเคลื่อน ระบบที่ให้การตอบสนองที่ล้าช้า ย่อมดีกว่าระบบที่ให้การตอบสนองที่เฉื่อยชา (Sluggish) และระบบที่ให้การตอบสนองที่เสถียร (stable) ย่อมดีกว่าระบบที่ให้การตอบสนองที่ไม่เสถียรภาพหรือควบคุมไม่ได้ (Unstable) จึงกล่าวได้ว่า การเลือกใช้ระบบควบคุมจะต้องพิจารณาจากปัจจัยดังต่อไปนี้

- ความแม่นยำของการเข้าหาจุดหมาย (Accuracy)
- ความรวดเร็วในการเข้าหาจุดหมาย (Speed)
- ความเสถียร (Stability)
- ความน่าเชื่อถือของระบบ (Reliability)

ระบบควบคุมที่ขาดความแม่นยำย่อมนำไปใช้ประโยชน์ไม่ได้ และไม่สามารถนำไปใช้งานได้ ซึ่งความแม่นยำของระบบนี้ เป็นส่วนที่สำคัญมากในการออกแบบระบบแต่ในขณะเดียวกันความแม่นยำของระบบก็ต้องมีความสม่ำเสมอ คงเส้นคงวา (Consistency) ด้วยเช่นกัน นั่นคือ เมื่อมีการทำงานซ้ำ ๆ กันหลาย ๆ ครั้ง หมายความว่าทุกครั้งที่เราสั่งให้ระบบควบคุมทำงานไปตามเป้าหมายที่เราต้องการระบบควบคุมจะต้องทำงานได้แม่นยำทุกครั้ง จึงจะได้ชื่อว่ามี ความน่าเชื่อถือ (Reliability) ส่วนความรวดเร็วในการตอบสนองก็เช่นกัน ระบบควบคุมที่มีการตอบสนองที่แม่นยำไม่มีการคลาดเคลื่อนเลย แต่ใช้เวลานานมากในการเข้าสู่จุดหมายหรือ steady state ประโยชน์ไม่ได้ เช่นการควบคุม ก็ถือว่าระบบนี้ไม่เหมาะสม เนื่องจากการทำงานของเครื่องจักร ย่อมต้องการผลผลิตที่มากแต่ใช้เวลาในการทำงานน้อย และเช่นกันกับระบบที่ตอบสนองได้รวดเร็วแต่ไม่สามารถรักษาความเสถียรได้จะเกิดปัญหา ทำให้ไม่ได้ขนาดของชิ้นงานตามที่ต้องการ ถือว่าระบบนี้ก็ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน

ดังนั้นจะเห็นว่า ความแม่นยำ ความรวดเร็ว และความเสถียร นอกจากจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณภาพของระบบควบคุมแล้วยังเป็นปัจจัยที่จำเป็นอย่างยิ่งสำหรับระบบควบคุมอัตโนมัติทุกระบบจะขาดสิ่งใดสิ่งหนึ่งไม่ได้ ในทางปฏิบัติแล้วในระบบหนึ่ง ๆ จะทำให้การตอบสนองทั้งสามนี้ดีที่สุดทั้งสามอย่างนั้นเป็นเรื่องที่ยากมาก แต่ถ้าหากทำได้ในค่าที่เหมาะสมค่า ๆ หนึ่งกับการใช้งานก็ถือว่าเพียงพอแล้ว

## อุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่ง (Position Sensor)

ระบบควบคุมทุกระบบจำเป็นจะต้องมีอุปกรณ์สำหรับตรวจจับขบวนการที่เราต้องการจะควบคุม เพื่อให้ทราบถึงสถานะภาพของระบบนั้น ๆ แล้วป้อนกลับไปยังอุปกรณ์ควบคุมระบบ ในระบบควบคุมตำแหน่งก็เช่นกันจำเป็นจะต้องมีอุปกรณ์ตรวจจับเหล่านี้ ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจจับตำแหน่งจะมี 2 ลักษณะคือ

### 1. อุปกรณ์ที่ใช้วัดในเชิงเส้น (Linear position measurement)

เป็นการวัดระยะทางในการเคลื่อนที่ของงาน ได้ตลอดความยาวของการเคลื่อนที่ และจะเป็นการวัดค่าจริงของการเคลื่อนที่ของงานนั้น ๆ ออกมา โดยส่วนมากมักจะใช้โปเทนทิโอมิเตอร์แบบเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง และอินคริเมนทัลทอลเลนโค็ดเดอร์แบบลิเนียร์ อุปกรณ์ที่ใช้วัดลักษณะนี้จะอ่านค่าระยะทางออกมาได้โดยตรงโดยไม่ต้องมีการแปลงค่าอีก แต่จะมีขีดจำกัดเรื่องความยาวของอุปกรณ์ที่ใช้วัด ซึ่งจะทำให้วัดระยะทางได้ไม่มากเท่าที่ควร และยิ่งถ้าเราเพิ่มระยะการวัดมากเท่าใด ราคาของอุปกรณ์จะสูงตามไปด้วย

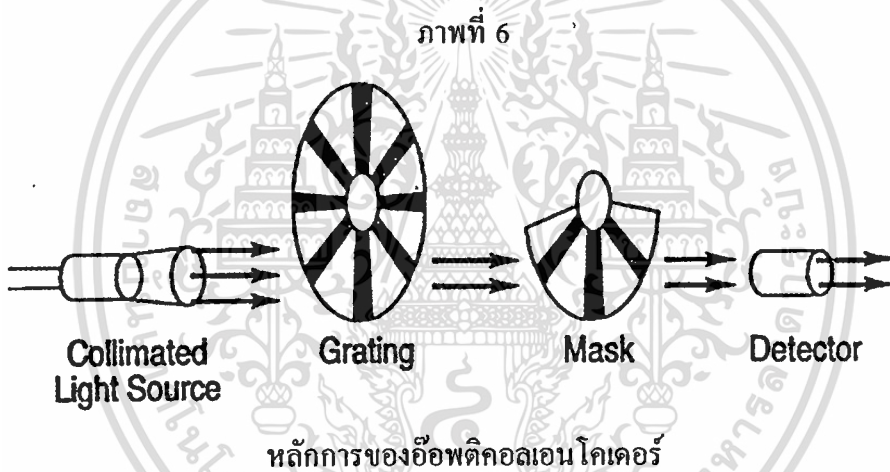
### 2. อุปกรณ์ที่ใช้วัดในเชิงมุม (Angular position measurement)

เป็นการวัดค่าที่เปลี่ยนแปลงไปตามองศาต่าง ๆ อุปกรณ์ที่ใช้วัดในเชิงมุมนี้ สามารถใช้วัดได้ในระบบควบคุมที่มีการเคลื่อนที่เป็นเชิงมุม และระบบควบคุมที่เป็นเชิงเส้น ซึ่งในระบบควบคุมที่มีการเคลื่อนที่เป็นเชิงมุม จะสามารถอ่านค่าจากการเปลี่ยนแปลงของอุปกรณ์วัดและเปลี่ยนเป็นองศาได้เลย โดยไม่ต้องคำนึงถึงระบบขับเคลื่อนทางกลมากนักแต่ในทางกลับกัน ถ้านำเอาอุปกรณ์วัดลักษณะนี้มาใช้เป็นอุปกรณ์วัดระยะทางในการเคลื่อนที่ในเชิงเส้น จำเป็นจะต้องมีการแปลงค่าระบบขับเคลื่อนทางกลให้เป็นระยะทางต่อองศาที่เปลี่ยนแปลงไป อุปกรณ์ที่ใช้วัดตำแหน่งในเชิงมุมที่จะกล่าวถึงในที่นี้คือ อีพดิกอลเลนโคเดอร์

ในระบบควบคุมตำแหน่งด้วยเซอร์โวมอเตอร์นั้นจำเป็นที่จะต้องใช้อุปกรณ์อ่านค่าตำแหน่งซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ก็มีอยู่หลายชนิดเช่น แบบแม่เหล็ก (Magnetic) แบบคอนแทก (Contact) แบบรีซิสทีฟ (Resistive) และแบบออปติคัล (Optical) แต่แบบที่มีความแม่นยำในการควบคุมตำแหน่งและนิยมใช้กันมากที่สุดคือ อีพดิกอลเลนโคเดอร์ ซึ่งจะได้อ่านค่าโดยละเอียดต่อไป

## ออปติคอลลอนโคเดอร์ ( Optical Encoder )

ออปติคอลลอนโคเดอร์ทำงานโดยมีแผ่นงานแกร์ททิง (Grating) แผ่นหนึ่งซึ่งหมุนอยู่ระหว่างแหล่งของแสงและอุปกรณ์ตรวจจับ (Detector) แสงที่ส่องผ่านทะลุบริเวณที่ให้แสงผ่านได้ของแผ่นงานดังกล่าวไปยังอุปกรณ์ตรวจจับแสง และแสงที่อุปกรณ์ตรวจจับมองเห็นเรียกว่า เอ้าพุท (output) เพื่อเพิ่มการกระจายแสง แสงจะถูกปรับให้เป็นลำแสงตรง ๆ และจะมีแผ่นมี้าสก์ (mask) อีกแผ่นหนึ่งวางซ้อนอยู่ระหว่างแผ่นงานแกร์ททิงและอุปกรณ์ตรวจจับแผ่นงานทั้งสองนี้จะทำให้เกิดภาวะการปิด-เปิด เนื่องจากแสงจะส่องผ่านไปยังอุปกรณ์ตรวจจับได้ก็ต่อเมื่อช่องบริเวณที่ขอมให้แสงผ่านของทั้งสองแผ่นอยู่ตรงกันเท่านั้น



ออปติคอลลอนโคเดอร์ แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

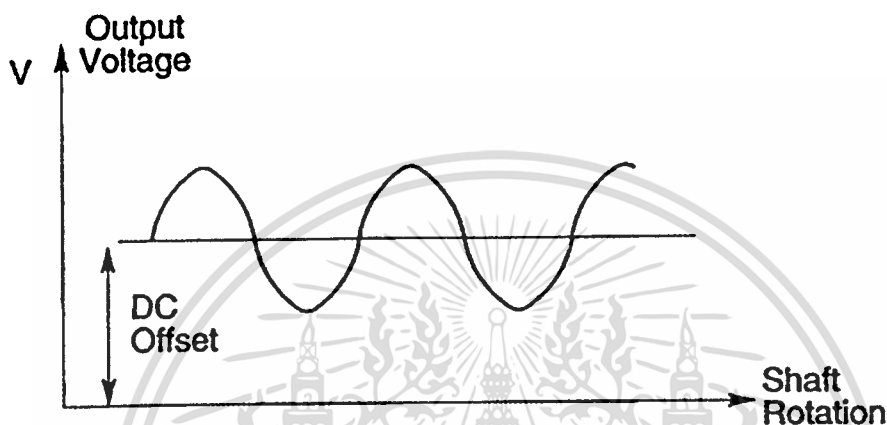
1. อินครีमेंทอล เอ็นโคเดอร์ (Incremental Encoder)
2. แอ็บโซลูท เอ็นโคเดอร์ (Absolute Encoder)

### อินครีमेंทอล เอ็นโคเดอร์ (Incremental Encoder)

นักออกแบบระบบนิยมนำเอาอินครีमेंทอลเอ็นโคเดอร์มาใช้ในงานอุตสาหกรรม ทั้งนี้เนื่องจากมีราคาต่ำและปัญหาจุกจิกในการซ่อมแซมมีน้อย อุปกรณ์หลักมีเพลาซึ่งติดกับแผ่นดิสก์ที่ประกบติดกับแผ่นงานแกร์ททิง (grating) ซึ่งจะหมุนอยู่ระหว่างแหล่งของแสงและอุปกรณ์ตรวจจับแสง แหล่งของแสงอาจจะเป็นไดโอด (diode) ที่เปล่งแสงได้หรืออาจจะเป็นหลอดไฟที่มีไส้ก็ได้ ส่วนอุปกรณ์ในการตรวจจับแสงนั้นโดยปกติมักจะเป็นโฟโตทรานซิสเตอร์ (Phototransistor) หรือ

โฟโวลต์ที่จไดโอด (Photovoltaic diode) ด้วยหลักการทำงานง่าย ๆ นี้จะได้เอาพุตเดี่ยว ที่ก่อให้เกิด ดีซีออฟเซ็ท (DC offset) ซึ่งจะแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ จึงทำให้สัญญาณนี้ยากแก่การนำไปใช้งาน

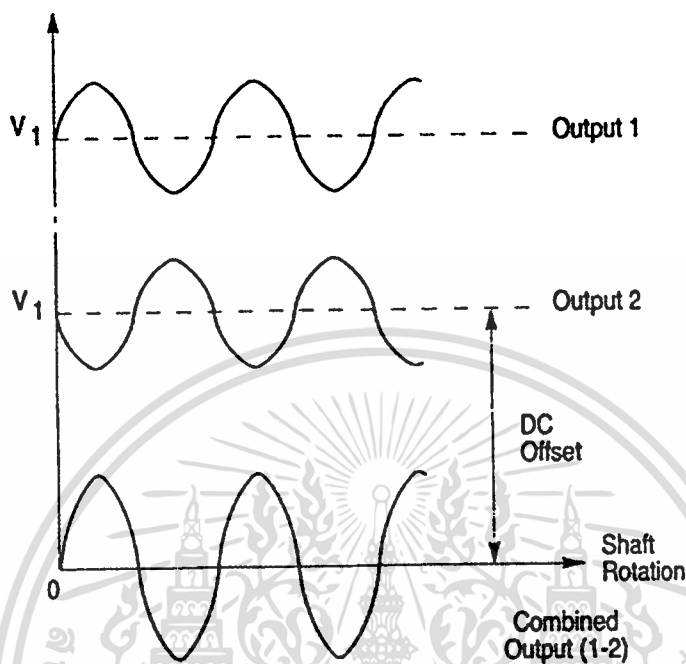
ภาพที่ 7



แรงเคลื่อนไฟฟ้าเอาพุตของเอ็น โคเดอร์

ในทางปฏิบัติจะใช้ไดโอดสองแสง (Photodiode) 2 ตัว และแผ่นบังแสง (mask) 2 แผ่น ซึ่งทำให้เกิดสัญญาณที่มีเฟสที่มีความแตกต่างกัน  $180^\circ$  สำหรับแต่ละช่องสัญญาณ เอาพุตของทั้งสอง ไดโอดนั้นจะหักล้างกัน ดังนั้นจึงไม่ทำให้เกิดการลดค่าดีซีออฟเซ็ท (DC offset) ดังภาพที่ 8 ข้างล่างนี้

ภาพที่ 8

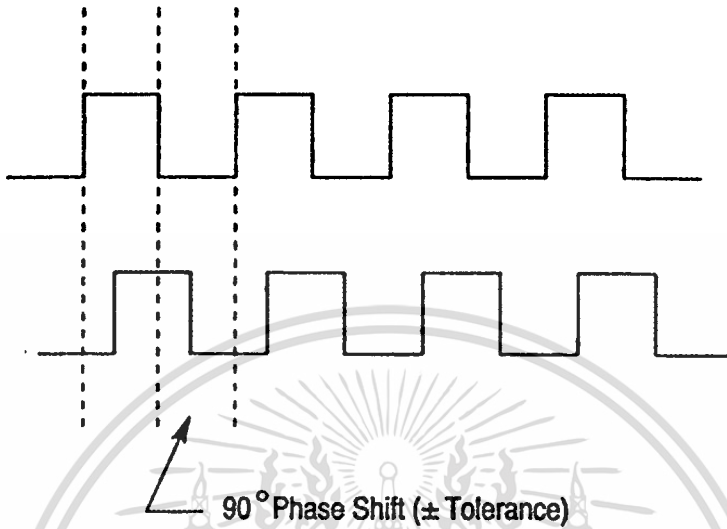


เข้าพุทจากระบบการใช้โฟโตไดโอด (Photodiode) 2 ตัว

สัญญาณเข้าพุทกึ่งต่อเนืองนี้อาจจะเอาไปใช้ในกระบวนการไม่ได้ แต่บ่อยครั้งที่มันถูกนำไปขยายหรือนำไปใช้เพื่อสร้างเป็นสัญญาณคลื่นรูปสี่เหลี่ยม อินครีเมนทอล โรตา รีเอนโคเดอร์ (Incremental rotary encoder) อาจจะมีสัญญาณเข้าพุทเป็นคลื่นไซน์ (sine) หรือคลื่นรูปสี่เหลี่ยม ตามปกติจะมีช่องสัญญาณได้ถึง 3 ช่อง

เอ็นโคเดอร์แบบ 2 ช่องนั้นบอกได้ทั้งตำแหน่งเพลลาของเอ็นโคเดอร์และบอกทิศทางการหมุนโดยสังเกตที่สัญญาณช่องนำ (leading channel) ซึ่งช่องเหล่านี้อยู่เยื้องกันเป็นรูปสี่เหลี่ยม (ดังภาพที่ 9)

## ภาพที่ 9



## สัญญาณเข้าพุทรูปสี่เหลี่ยม

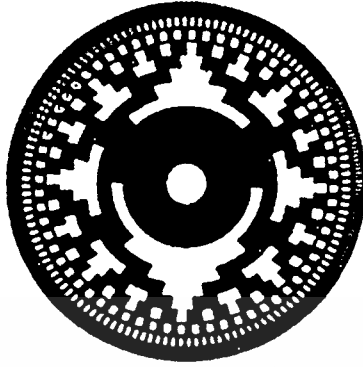
สำหรับเครื่องมือจักรกลหรืออุปกรณ์กำหนดตำแหน่งโดยส่วนมากที่มีช่องสัญญาณช่องที่ 3 อยู่ด้วยจะเรียกช่องสัญญาณนี้ว่าช่องอินเด็กซ์ (index) หรือช่องแซท (Z) ซึ่งอินพุทที่ได้จะเป็นเข้าพุทเดี่ยว 1 พัลส์ต่อ 1 รอบ และจะใช้ได้ก็ต่อเมื่อมีการตั้งค่าศูนย์ (Zero) ไว้

อัตราการแกว่ง (Slew rate) หรือความเร็วของอินครีเมนทอลโรตารี เอ็นโคเดอร์ (Incremental rotary encoder) นั้นจะมีค่าสูงสุดได้เท่า ๆ กับค่าความถี่สูงสุดที่เครื่องสามารถทำได้ (ประมาณ 100 KHz) ถ้ามากกว่านี้เข้าพุทที่ได้จะไม่มีความน่าเชื่อถือและขาดความแม่นยำ

## แอ็บโซลูต เอนโคเดอร์ (Absolute Encoders)

แอ็บโซลูตเอนโคเดอร์เป็นอุปกรณ์กำหนดตำแหน่งที่ให้ข้อมูลเพียงตำแหน่งเดียวสำหรับแต่ละตำแหน่งของเพลต และตำแหน่งของเพลตนี้ ก็จะเป็นเอกเทศไม่เกี่ยวข้องกับตำแหน่งอื่น ๆ ซึ่งไม่เหมือนกับอินครีเมนทอลเอนโคเดอร์ที่จะต้องมีการอ้างอิงตำแหน่งอื่นประกอบด้วย

ภาพที่ 10



แผ่นดิสก์ของแอมป์โซลุตเอน โคเคอร์

ภาพที่ 11



แผ่นดิสก์ของอินกรีเม้นทอลเอน โคเคอร์

ในแอมป์โซลุตเอน โคเคอร์มีแทร็ก (Track) หลายแทร็กโดยแทร็กเหล่านี้ ใช้จุดศูนย์กลางร่วมกัน แต่ละแทร็กจะมีแหล่งกำเนิดแสงของตนเอง เมื่อแสงส่องผ่านช่อง (slot) จะได้ภาวะถูกต้อง “1” ถ้าแสงส่อง แต่ไม่สามารถผ่านช่องก็จะได้ภาวะผิด “0” จากรูปแบบของ 1's และ 0's นี้ เราสามารถหาดำแหน่งของเพลตได้เช่นกัน

แผ่นแทร็กนี้จะถูกเจาะเป็นช่อง ๆ หลายขนาดโดยขอบนอกสุดถูกเจาะเป็นช่องเล็ก ๆ และเริ่มขยายใหญ่ขึ้น ๆ เมื่อเข้าใกล้จุดศูนย์กลาง (ดังภาพที่ 1) การที่จะมีแทร็กก็แทร็กนั้นขึ้นอยู่กับจำนวนข้อมูลตำแหน่งที่ต้องการหรือเรียกอีกอย่างว่ารีโซลูชัน ตัวอย่างเช่นถ้าแผ่นดิสก์มี 10 แทร็ก จะได้รีโซลูชันเท่ากับ  $1,024$  ต่อรอบ หรือ  $2^{10}$

สำหรับแผ่นดิสก์ของแอมป์โซลุตเอน โคเคอร์นี้ถ้าทำด้วยโลหะจะมีความน่าเชื่อถือมากกว่าแผ่นดิสก์ที่ทำด้วยแก้วเพราะไม่มีความเปราะและมีแรงเฉือนน้อยกว่า

### บทที่ 3

### ชนิดและคุณสมบัติของมอเตอร์

มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่ถือได้ว่าเป็นหัวใจของเครื่องจักรที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมโดยทั่วไป ทั้งนี้เนื่องจากมอเตอร์เป็นตัวต้นกำลังที่จะไปขับเคลื่อนให้เครื่องจักรเหล่านั้นทำงานได้ตามต้องการ ซึ่งมอเตอร์ที่มีใช้กันอยู่โดยทั่วไปทั้งในโรงงานอุตสาหกรรมและในบ้านเรือนนั้น เราสามารถจำแนกออกเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้เป็น 3 กลุ่มตามโครงสร้างดังต่อไปนี้

#### ชนิดของมอเตอร์

- เอซีมอเตอร์ (AC Motor)
  - เอซี อินดักชันมอเตอร์ (AC Induction Motor)
  - เอซี ซิงโครนัสมอเตอร์ (AC Synchronous Motor)
- ดีซีมอเตอร์ (DC Motor)
  - ดีซีมอเตอร์แบบมีแปรงถ่าน (Brush DC Motor)
  - ดีซีมอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Motor)
- สเต็ปเปอร์มอเตอร์ (Stepper Motor)
  - วีอาร์มอเตอร์ (VR Motor)
  - พีเอ็มมอเตอร์ (PM Motor)
  - ไฮบริดมอเตอร์ (Hybrid Motor)

มอเตอร์แต่ละชนิดมีคุณสมบัติเฉพาะที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นในการที่จะนำมอเตอร์ไปใช้งานจำเป็นต้องอย่างองที่จะต้องศึกษาคุณสมบัติเฉพาะของมอเตอร์แต่ละชนิดให้เข้าใจถ่องแท้เสียก่อนแล้วจึงค่อยตัดสินใจเลือกนำมอเตอร์ชนิดนั้น ๆ ไปใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะของงาน และภาระที่จะนำมาต่อเข้ากับมอเตอร์ ซึ่งคุณสมบัติเฉพาะของมอเตอร์ประกอบด้วยคุณสมบัติด้านความเร็ว แรงบิดทวน ลักษณะการทวน ซึ่งจะได้อธิบายโดยแบ่งตามชนิดของมอเตอร์ตามลำดับดังนี้คือ

เอชีมอเตอร์ (AC Motor)

เอชีมอเตอร์ เป็นมอเตอร์กระแสไฟฟ้าสลับที่ได้รับความนิยมในการนำไปใช้งานมากที่สุดในปัจจุบันนี้ ซึ่งเอชีมอเตอร์นี้แบ่งออกตามคุณสมบัติเฉพาะได้อีก 2 ชนิด คือ

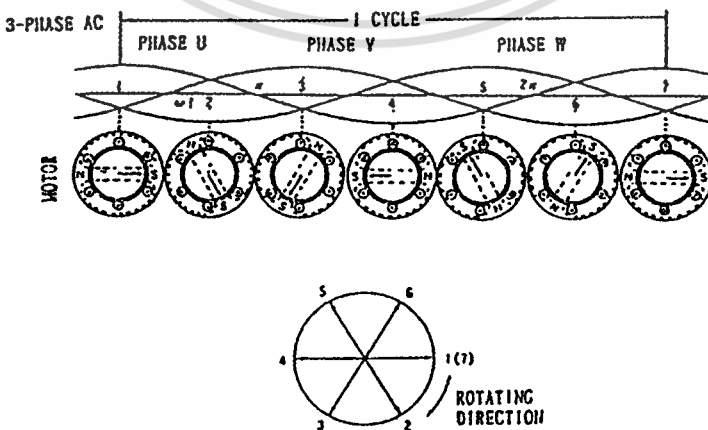
1. เอชี่อินดักชันมอเตอร์ (AC Induction Motor)
2. เอชี่ซิงโครนัสมอเตอร์ (AC Synchronous Motor)

อินดักชันมอเตอร์เป็นมอเตอร์ที่ได้รับความนิยม ในการนำไปใช้งานในวงการอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวางเป็นเวลานานมาแล้วทั้งนี้เนื่องจากมอเตอร์ชนิดนี้มีปัญหาในการดูแลรักษาน้อยเมื่อเทียบกับมอเตอร์ชนิดอื่น ๆ

เอชี่อินดักชันมอเตอร์ (AC Induction Motor)

ในภาพที่ 12 แสดงถึงสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นที่สเตเตอร์ ทั้งนี้เมื่อเราจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสเข้าที่ขดลวดของสเตเตอร์ เมื่อโรเตอร์หมุนตัดกับเส้นแรงแม่เหล็กนี้ จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในโรเตอร์ และเกิดกระแสไหลวนขึ้นในโรเตอร์ จึงทำให้เกิดแรงบิดหมุนตามกฎมือซ้ายของเฟลมมิง ดังนั้นจึงทำให้โรเตอร์หมุนไปตามทิศทางของสนามแม่เหล็กที่หมุนอยู่ที่ขดลวดสเตเตอร์

ภาพที่ 12



แสดงสนามแม่เหล็กหมุนของอินดักชันมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อโรเตอร์หมุนไปในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุน จนกระทั่งความเร็วของโรเตอร์เท่ากับความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนแล้ว การหมุนของโรเตอร์จะไม่เกิดการตัดกับสนามแม่เหล็กและจะไม่เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในโรเตอร์ จึงทำให้ไม่มีกระแสไหลในโรเตอร์ เมื่อไม่มีกระแสไหลในโรเตอร์ แรงบิดหมุนที่เกิดขึ้นระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์จะหายไป ทำให้ความเร็วของโรเตอร์ลดลง ซึ่งการลดความเร็วของโรเตอร์จะลดลงมาทีละ ๆ หนึ่ง และจะคงที่ที่ความเร็วนั้น ๆ เรียกว่า ความเร็วของโรเตอร์หรือความเร็วในระดับที่ใช้งานของมอเตอร์ ส่วนความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนเรียกว่า ความเร็วซิงโครนัส ซึ่งค่าความแตกต่างของความเร็วซิงโครนัสกับความเร็วของโรเตอร์ เราเรียกว่าสลลิป ซึ่งสลลิปนี้เป็นปัจจัยสำคัญสำหรับคุณสมบัติของแรงบิดหมุนของอินคัตชันมอเตอร์

โดยที่

$$n_s = \frac{120f_s}{P} \quad (1)$$

$$n_r = n_s(1-S)$$

$$n_r = \frac{120f_s}{P}(1-S) \quad (2)$$

เมื่อ  $n_r$  = ความเร็วที่เพลลาของมอเตอร์ (รอบต่อนาที)

$n_s$  = ความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ (รอบต่อนาที)

$f_s$  = ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟที่ให้กับมอเตอร์ (เฮิรตซ์)

$P$  = จำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์ (ขั้ว)

$S$  = ค่าสลลิปที่เกิดขึ้นระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์

เมื่อให้  $\omega$  เป็นค่าความเร็วเชิงมุมของความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที เราสามารถหาค่าความเร็วเชิงมุม ซิงโครนัสของมอเตอร์ได้ คือ

$$\omega_s = \frac{2\omega}{P} \quad (3)$$

จากสมการที่ 2 สามารถหาค่าสลลิปของมอเตอร์ได้ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S = \frac{n_s \omega_s - n_r}{n_s}$$

$$S = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \quad (4)$$

เมื่อ  $\omega_s$  = เป็นความเร็วเชิงมุมซิงโครนัส (เรเดียนต่อวินาที)

$\omega_m$  = เป็นความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ (เรเดียนต่อวินาที)

### คุณสมบัติของแรงบิดหมุนของอินดักชันมอเตอร์

จากการทำงานของอินดักชันมอเตอร์ เราสามารถเขียนวงจรสมมูลทางไฟฟ้าแสดงสภาพการทำงานของอินดักชันมอเตอร์ [1] เพื่อหาคุณสมบัติของแรงบิดหมุนในสถานะที่ความเร็วต่าง ๆ กัน ในวงจรสมมูลนี้ ซึ่งเป็นการถ่ายโอนค่าความต้านทานและค่ารีลักแตนซ์จากโรเตอร์มาที่สเตเตอร์

ในวงจรสมมูลนี้จะแทนค่าความต้านทานของโรเตอร์

$R_2$  = ค่าความต้านทานของโรเตอร์

$X_2$  = ค่ารีลักแตนซ์ต่อเฟสที่เกิดขึ้นในโรเตอร์

$R_1$  = เป็นค่าความต้านทานของขดลวดในสเตเตอร์ของแต่ละเฟส

$X_1$  = ค่ารีลักแตนซ์ที่เกิดขึ้นในสเตเตอร์ของมอเตอร์ของแต่ละเฟส

ในส่วนของวงจรโรเตอร์นั้น ค่าความถี่ที่เกิดขึ้น จะเป็นความถี่สลิป

เมื่อ  $e_{ag}$  เป็นค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ในขณะที่ต่อมอเตอร์เข้ากับแหล่งจ่ายไฟต่อเฟส  $v_s = \sqrt{2} V_s \sin \omega t$  ซึ่งแหล่งจ่ายไฟนี้จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กในช่องอากาศ ( $\phi_{ag}$ ) ที่จะไปเหนี่ยวนำกับตัวนำในโรเตอร์ ในสภาพเช่นนี้จะทำให้เกิดอินดักแตนซ์ในส่วนการสร้างแม่เหล็ก ( $L_m$ ) และ  $n_s$  เป็นจำนวนรอบของขดลวดในสเตเตอร์

$$L_m I_m = n_s \phi_{ag}$$

$$\phi_{ag} = k_1 I_m \quad (5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกฎของฟาร์ราเดย์

$$e_{ag} = n_s \frac{d\phi_{ag}}{dt}$$

เมื่อ  $\phi_{ag}$  ที่เกิดจากแหล่งจ่าย  $i_s = \sqrt{2} V_s \sin \omega t$  จะทำให้ได้เส้นแรงแม่เหล็กใน ฟังก์ชันของเวลา  $\phi_{ag}(t) = \phi_{ag} \sin \omega t$

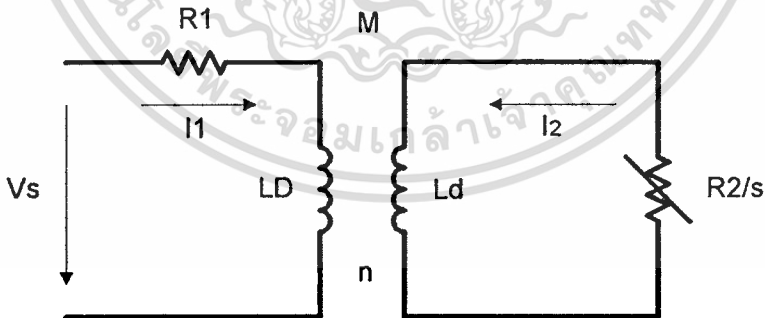
$$e_{ag} = n_s \omega \phi_{ag} \cos \omega t. \quad (6)$$

เมื่อทำให้  $E_{ag}$  เป็นค่า rms.

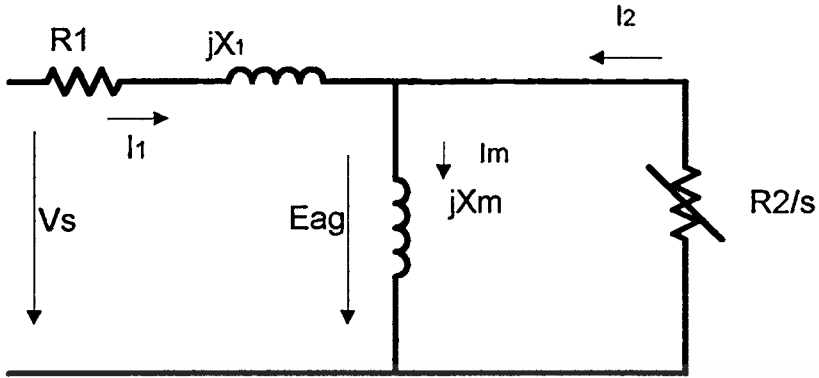
$$E_{ag} = k_3 f_s \phi_{ag} \quad (7)$$

เมื่อ  $k_3$  เป็นค่าคงที่ทางไฟฟ้า

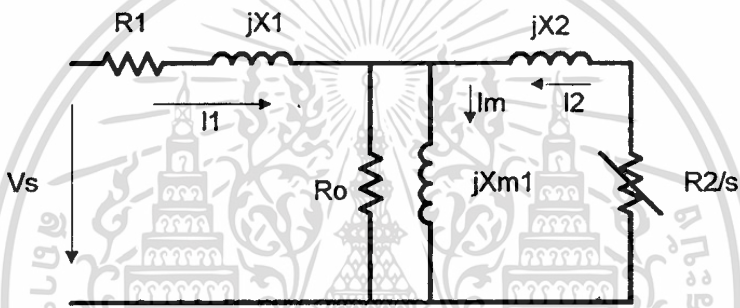
ภาพที่ 13



ก. แสดงวงจรสมมูลทางไฟฟ้า



ข. แสดงวงจรสมมูลย์ แบบวงจรตัวที่



ค. แสดงวงจรสมมูลย์เมื่อมีการถ่ายโอนค่ามาทางสเตเตอร์

แสดงวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของมอเตอร์แบบอินดักชัน

ในวงจรสมมูลภาพที่ 13 (ค.) จะมีค่า  $R_0$  ที่เกิดขึ้นขนานกับ  $X_m$  โดยที่  $R_0$  แสดงการสูญเสียที่เกิดขึ้นในสเตเตอร์และโรเตอร์ในขณะที่ไม่มีภาระเป็นการสูญเสียจากแม่เหล็กของแกนเหล็ก ส่วน  $J_{wm}$  เป็นการแสดงส่วนของอินดักแตนซ์ ในการสร้างเส้นแรงแม่เหล็กที่สัมพันธ์ระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ เราสามารถหาค่ากระแสที่เข้าสู่มอเตอร์ด้วย  $I_1, dki$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_m + \bar{I}_2 \quad (8)$$

$$I_2 = \frac{E_{ag}}{\frac{R_2}{S} + jX_2} \quad (9)$$

จากสมการที่ 4  $E_{ag}$  เป็นแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดจากเส้นแรงแม่เหล็กที่ส่งผ่านช่องอากาศมาสู่โรเตอร์ เพื่อทำให้เกิดกำลังงานไฟฟ้าขึ้นที่โรเตอร์

$$E_{ag} = I_2 \frac{R_2}{s} + I_2 J X_2 \quad (10)$$

$$I_2 E_{ag} = I_2^2 \frac{R_2}{s} + I_2^2 J X_2 \quad (11)$$

จากสมการที่ 6 กำลังงานไฟฟ้าที่ส่งผ่านจากสเตอรเตอร์สู่โรเตอร์จะมี 2 ส่วน คือ ส่วนที่ไปกำเนิดแรงบิดหมุนและส่วนที่เป็นพลังงานสะสม ถ้าคิดเฉพาะส่วนที่เป็นกำลังงานเพื่อเกิดแรงบิดหมุนจะได้

$$P_{ag} = I_2 \frac{R_2}{s} \quad (12)$$

แต่จะมีส่วนหนึ่งที่สูญเสียไปกับค่าความต้านทานใน โรเตอร์เป็นค่าสูญเสียในขดลวดของโรเตอร์

$$P_{ag} = P_{em} + P_r \quad (13)$$

$$P_r = I_2^2 R_2 \quad (14)$$

$$P_{em} = I_2^2 \frac{R_2 (1-s)}{s}$$

$$P_{em} = P_{ag}(1-s) \quad (15)$$

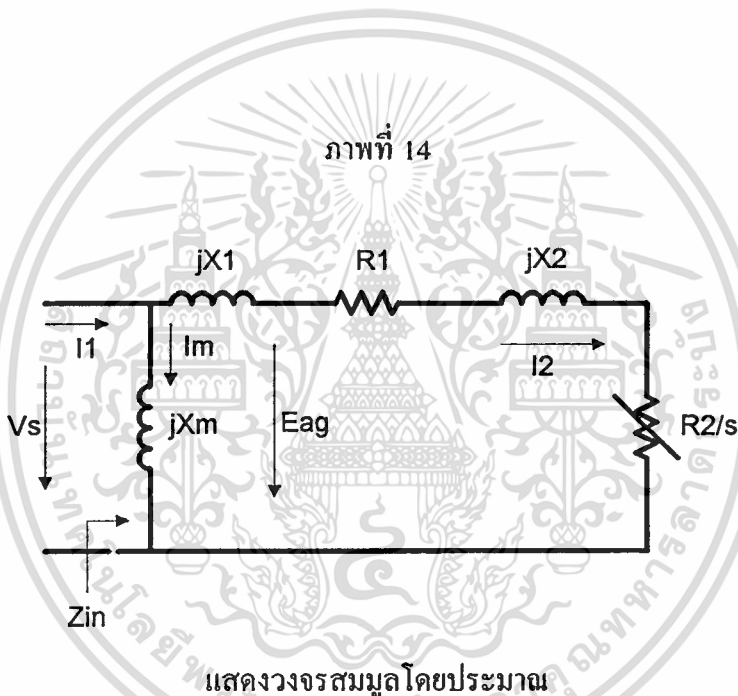
เมื่อ  $P_{em}$  เป็นกำลังงานไฟฟ้าที่ทำให้เกิดกำลังงานทางกลขึ้นที่เพลของมอเตอร์ ซึ่งจะสามารทำให้เกิดแรงบิดหมุน ( $T_{em}$ ) ขึ้นที่เพลและหมุนภาระ ไปที่ความเร็วที่ต้องการ

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_m}$$

$$T_{em} = \frac{P_{eg}(1-S)}{\omega_s(1-S)}$$

$$T_{em} = \frac{P_{eg}}{\omega_s} \quad (16)$$

จากภาพที่ 13 ค่าอิมพีแดนซ์ของ  $X_m^2 \approx (R_1^2 + X_1^2)$  ซึ่งทำให้แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ  $E_{ag} \approx V_s$  ซึ่งจะเป็นการง่ายในการคำนวณ เราสามารถย้ายค่า  $X_m$  มาไว้ที่แหล่งจ่าย โดยใช้  $E_{ag}$  ดังภาพที่ 14



ซึ่งจะทำให้เราสามารถหาค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ได้ด้วยสมการ

$$Z_{in} = \frac{-X_m(X_1 + X_2) + jX_m(R_1 + R_2/S)}{R_1 + R_2/S + j(X_m + X_1 + X_2)} \quad (17)$$

เมื่อคิดเฉพาะส่วนของกระแสที่ไหลเข้าโรเตอร์ดังสมการ

$$I_2 = \frac{V_s}{[(R_1 + R_2/s)^2 + (X_1 + X_2)^2]^{1/2}} \quad (18)$$

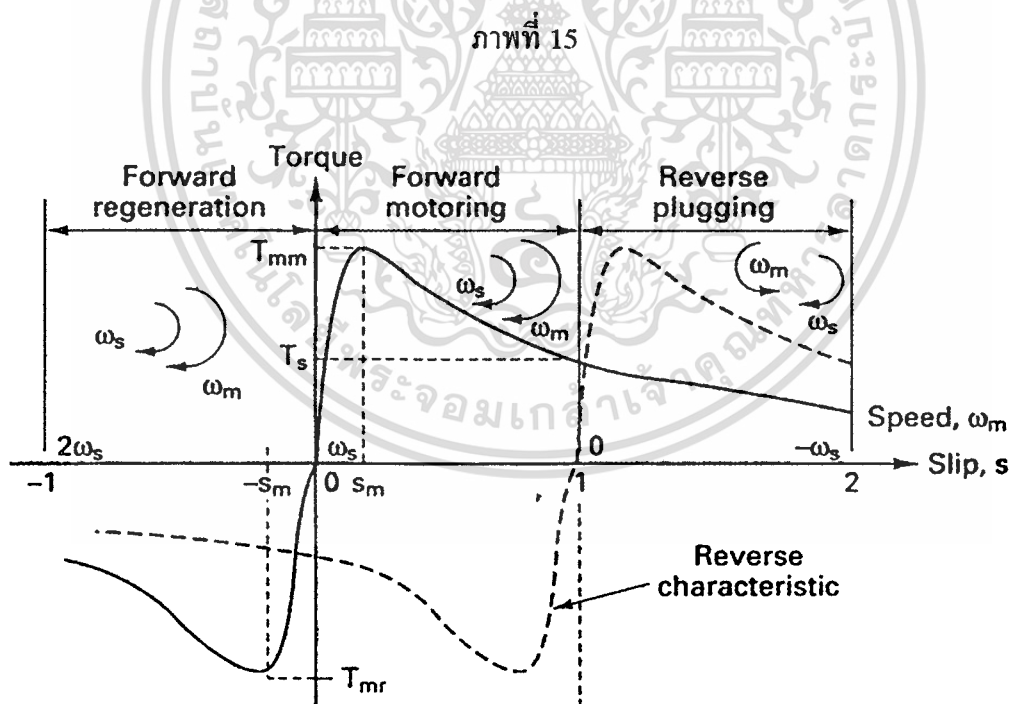
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการที่ (18) ลงในสมการที่ (12) และสมการที่ (16) ให้อยู่ในรูปของกำลังงานไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้เกิดค่าแรงบิดหมุนขึ้นที่เพลของมอเตอร์ คำสมการ

$$T_{em} = \frac{R_2 V_s^2}{S \omega_s [(R_1 + R_2/S) + (X_1 + X_2)^2]} \quad (19)$$

ถ้าต่อมอเตอร์เข้ากับแหล่งจ่ายไฟที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าคงที่และมีความถี่ที่คงที่แล้ว มอเตอร์จะเกิดแรงบิดหมุนที่เพลของมอเตอร์ในฟังก์ชันของค่าสลลิปที่เปลี่ยนแปลงไป ดังภาพที่ 15 ซึ่งจะมีย่านการทำงานอยู่ 3 ย่าน คือ

- (1) ย่านที่ทำงานเป็นมอเตอร์เป็นย่านระหว่าง  $0 \leq s \leq 1$
- (2) ย่านการเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สามารถจ่ายพลังงานเข้าระบบได้ ซึ่งจะเป็นย่านการทำงานที่  $s < 0$ , และ
- (3) ย่านการทำงานเป็นเบรคในย่าน  $1 \leq s \leq 2$ .



แสดงคุณสมบัติของแรงบิดหมุน-ความเร็วของอินดัคชั่นมอเตอร์

จากคุณสมบัติของแรงบิดหมุนนี้โดยปกติแล้วย่านการทำงานของมอเตอร์จะอยู่ในย่าน  
 ที่  $s \approx 0$  ก็คือความเร็วของมอเตอร์เข้าใกล้ความเร็วซิงโครนัส ซึ่งจะส่งผลในค่า  $R_{2/s} \gg R_1$  และ  
 $(R_1 + R_{2/s})^2 \gg (X_1 + X_2)^2$  ดังนั้นในย่านการทำงานนี้จะให้ค่าแรงบิดหมุนโดยประมาณด้วย

$$T_{em} \approx \frac{R_2 V_s^2}{S \omega_s (R_{2/S})^2} \approx \frac{S V_s^2}{\omega_s R_2}$$

$$T_{em} \approx K \left[ \frac{V_s}{f_s} \right]^2 f_{sl} \tag{20}$$

เมื่อค่าของ  $V_s \sim e_{ag}$  สามารถเขียนสมการได้ใหม่

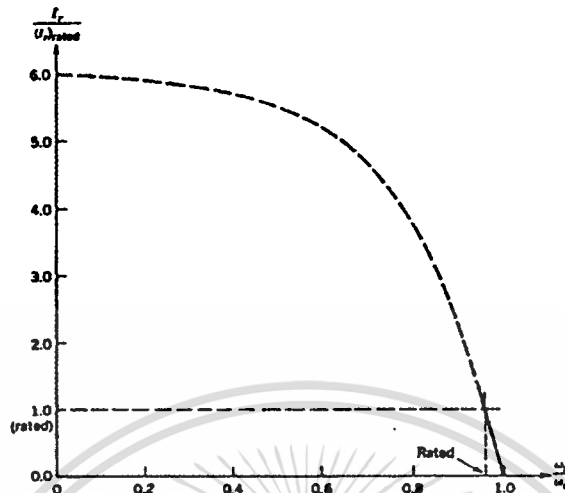
$$T_{em} \approx K \left[ \frac{E_{ag}}{f_s} \right]^2 f_{sl} \tag{21}$$

เมื่อ  $f_{sl}$  เป็นความถี่สลลิปที่เกิดขึ้นในโรเตอร์

คุณสมบัติของกระแสต่อความเร็วของอินดักชันมอเตอร์

ตามที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่ากระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์จะมีส่วนหนึ่งที่ใช้ไปสร้างสนามแม่เหล็ก ( $I_m$ ) และอีกส่วนหนึ่งไปทำให้เกิดแรงบิดหมุน ( $I_2$ ) ซึ่งกระแสส่วนนี้ได้แสดงไว้ในสมการที่ 18 ซึ่งสามารถนำไปเขียนเส้นกราฟแสดงได้ดังนี้

ภาพที่ 16



แสดงคุณสมบัติของกระแส  $I_2$  ต่อความเร็ว

จากที่กล่าวมาแล้วว่า ในการออกแบบการทำงานของอินดักชันมอเตอร์ จะทำงานในย่านที่  $s \approx 0$  ซึ่งทำให้ค่ากระแสที่ไหลในย่านนี้มีค่าประมาณดังสมการที่ (22) โดยที่ค่าของ  $R_2/s \gg R_1$  และ  $(R_1 + R_2/s)^2 \gg (X_1 + X_2)^2$

$$I_2 \approx \frac{SV_s}{R_2} \quad (22)$$

และถ้าแหล่งจ่ายของมอเตอร์คงที่และความถี่ของแหล่งจ่ายคงที่จะหาว่ากระแส  $I_2$  ซึ่งเป็นตัวที่ทำให้เกิดแรงบิดหมุนขึ้นที่เพลาของมอเตอร์มีค่าขึ้นอยู่กับค่าสลลิปหรือความสลลิป ณ ย่านที่ทำงานปกติ

$$I_2 \approx k_1 \frac{V_s}{f_s} fsl$$

เมื่อค่าของ  $V_s \sim E_{ag}$  สามารถเขียนสมการได้ใหม่

$$I_2 \approx k_1 \frac{E_{ag}}{f_s} fsl \quad (23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ดีซีมอเตอร์และเซอร์โวมอเตอร์ (DC Motor)

ดีซีมอเตอร์ มีประวัติอันยาวนานมาตั้งแต่ยุคของไมเคิล ฟาราเดย์ที่คิดค้นเครื่องกลไฟฟ้าที่ใช้แผ่นดิสก์เป็นส่วนที่หมุน ก่อนที่จะมีการพัฒนาเป็นอาร์มาเจอร์ของดีซีมอเตอร์ที่พบเห็นกันในปัจจุบัน ตลอดเวลาที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาลักษณะของมอเตอร์ชนิดนี้ให้ดีขึ้น แต่ยังคงรักษาหลักการทำงานไว้เหมือนเดิมถึงแม้ว่าจะมีการคิดค้นเอซี อินดักชันมอเตอร์ ซึ่งมีราคาถูกกว่าขึ้นมาใช้แล้วก็ตามแต่ดีซีมอเตอร์ก็ยังมีใช้อยู่มาจนถึงปัจจุบันนี้ เนื่องจากคุณสมบัติที่ดีของดีซีมอเตอร์ ไม่ว่าจะเป็นแรงบิดหมุนที่สูง อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้ในขบวนการที่ต้องการควบคุมความเร็วหรือควบคุมตำแหน่งที่ให้ค่าความแม่นยำสูง

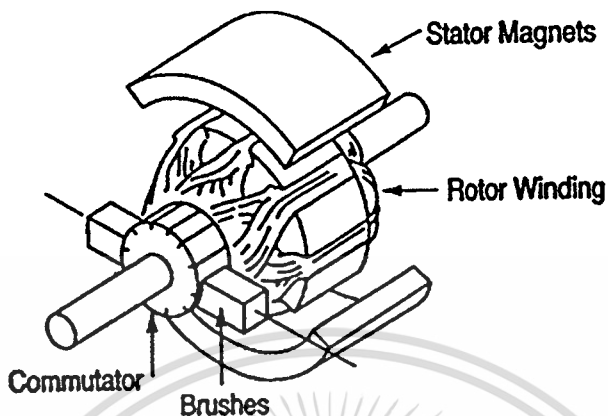
### ดีซีมอเตอร์แบบมีขั้วแปรงถ่าน (DC Brush Motor)

ในปัจจุบันเราจะพบเห็นดีซีมอเตอร์ที่มีรูปร่างหน้าตาที่แตกต่างกันออกไปแต่ยังคงรักษาหลักการทำงานเดิมไว้ได้ จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือ

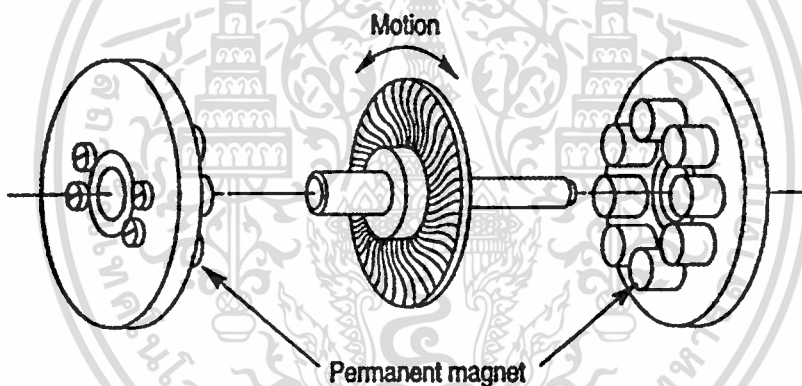
- ส่วนที่สร้างสนามแม่เหล็ก ในช่องอากาศซึ่งเป็นส่วนที่อยู่กับที่ ในส่วนที่สร้างสนามแม่เหล็กนี้จะเป็นแม่เหล็กถาวรหรือแม่เหล็ก ไฟฟ้าก็ได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของมอเตอร์
- ส่วนของอาร์มาเจอร์ ซึ่งเป็นขดลวดที่สร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาทำให้เกิดแรงผลักรกกับสนามแม่เหล็กของส่วนที่อยู่กับที่ ส่วนของอาร์มาเจอร์นี้จะต่อเข้ากับแหล่งจ่ายให้ดีซีภายนอกโดยผ่านแปรงถ่าน (Brush) เข้าที่คอมมิวเตเตอร์ของอาร์มาเจอร์ โดยที่คอมมิวเตเตอร์จะเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่จัดกระแสไฟให้กับขดลวดของอาร์มาเจอร์ให้เกิดสนามแม่เหล็กในทิศทางที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดแรงผลักรกกับสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์และทำให้เกิดแรงบิดหมุนที่ต่อเนื่อง ส่วนของอาร์มาเจอร์ในปัจจุบันมีการพัฒนาออกมาเป็น 3 ลักษณะคือ

1. อาร์มาเจอร์แบบที่มีขดลวดพันอยู่บนแกนเหล็ก (ดังภาพที่ 17 ก.)
2. อาร์มาเจอร์แบบที่ขดลวดขี้อยู่บนแผ่นปรี้นลักษณะเหมือนแผ่นดิส (ดังภาพที่ 17 ข.)
3. อาร์มาเจอร์แบบที่ขดลวดวางซ้อนกันเป็นเซลล์เป็นรูปกรวยทรงกระบอก (ดังภาพที่ 17 ค.)

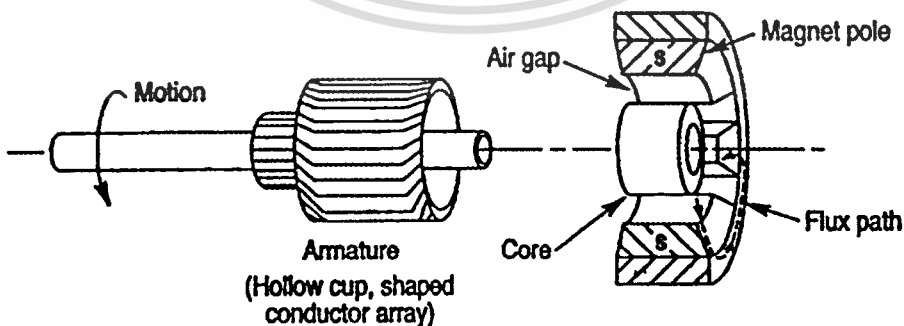
ภาพที่ 17



ก. ดีไซน์มอเตอร์แบบที่มีอาร์เมเจอร์เป็นแกนเหล็ก



ข. ดีไซน์มอเตอร์แบบที่มีอาร์เมเจอร์แบบคิสก์



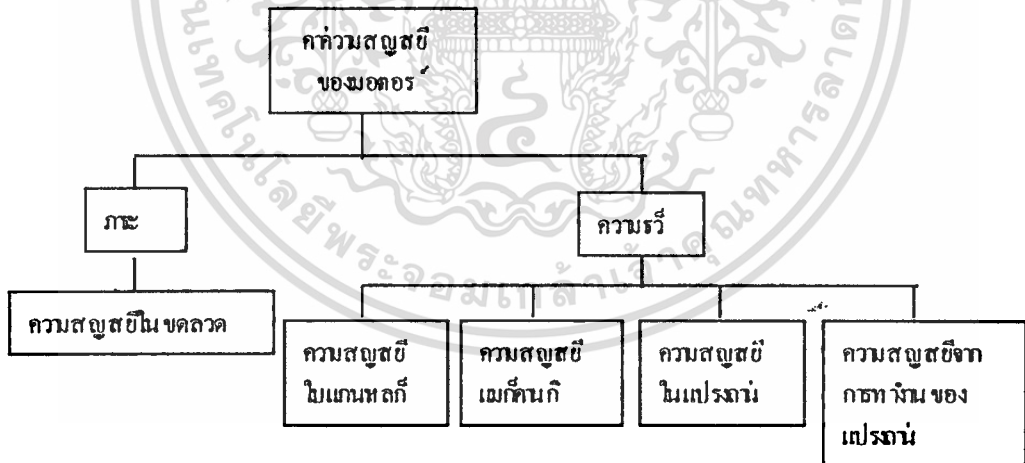
ค. ดีไซน์มอเตอร์แบบที่มีอาร์เมเจอร์แบบเชล (shell)

แสดงชนิดของดีไซน์มอเตอร์ที่มีอาร์มาเจอร์แบบต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งในแบบที่หนึ่งนี่จะเป็นแบบที่สามารถพบเห็นได้โดยทั่วไป โดยมีทั้งขนาดเล็กถึงขนาดใหญ่หลายร้อยแอมป์ แต่โดยโครงสร้างแบบนี้เป็นมอเตอร์ที่จะที่สามารถนำไปใช้ใช้งานที่ต้องการความเร็วไม่สูงมากนัก โดยจะมีแกนเหล็กที่ทำเป็นร่อง เพื่อพันขดลวดลงไปจึงเรียกมอเตอร์ลักษณะนี้ว่า “Iron-Core Motor” แบบที่สองและสามจะไม่มีแกนเหล็กเป็นตัวยึดขดลวด แต่จะยึดอยู่บนฉนวนเพื่อให้คงรูปอยู่ได้ จึงเรียกว่า ทั้งสองแบบนี้ว่า “Moving Coil” มอเตอร์ทั้งสองแบบนี้ มีข้อดีคือจะไม่มีเสียงรบกวน (แรงความเร็ว) ในแกนเหล็กและสามารถใช้กับงานที่มีความเร็วสูงมาก ๆ ได้โดยใช้พลังงานไฟฟ้าที่ต่ำ [9] ซึ่งดีซีมอเตอร์ที่กล่าวมาทั้งหมดจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีแปรงถ่าน (Brush) มาทำหน้าที่เป็นสะพานไฟฟ้าที่จะนำพลังงานไฟฟ้าจ่ายให้กับอาร์มาเจอร์ เราจึงเรียกดีซีมอเตอร์ทั้งหมดนี้อีกอย่างหนึ่งว่า “ดีซีมอเตอร์แบบมีแปรงถ่าน” (DC Brush Motor)

เราสามารถวิเคราะห์หาค่าความสูญเสียอันเกิดจาก โครงสร้างของดีซีมอเตอร์แบบมีแปรงถ่าน จะสามารถแบ่งการสูญเสียออกมาได้จาก 2 ส่วน ดังภาพที่ 19

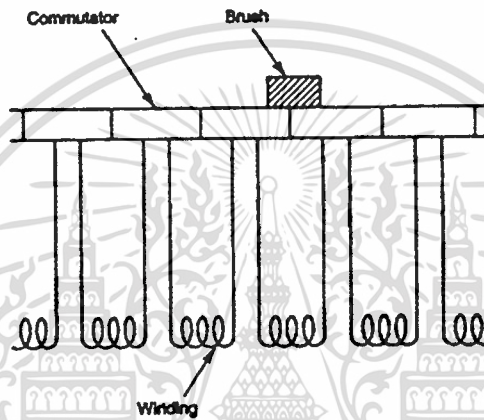


แสดงการสูญเสียในดีซีมอเตอร์แบบมีแปรงถ่าน

จากภาพที่ 18 ในขณะที่ดีซีมอเตอร์ทำงานขณะนั้น จะมีกระแสไหลเข้าไปในอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ทำให้เกิดการสูญเสียในขดลวดอาร์มาเจอร์ ( $I^2R$ ) ซึ่งค่าการสูญเสียนี้จะขึ้นอยู่กับภาระของมอเตอร์ ยิ่งมีภาระมากค่าการสูญเสียจะมากตามไปด้วย

ในขณะที่มอเตอร์ทำงานการหมุนของมอเตอร์จะทำให้เกิดการสูญเสียจากความฝืดของแปรงถ่านกับคอมมิวเตเตอร์ ลูกปืน และพัดลมระบบความร้อน ในขณะที่มอเตอร์ขั้วภาระจะเกิดสภาวะอาร์มาเจอร์รีแอ็กชันทำให้เกิดการลัดวงจรระหว่างซี่ของคอมมิวเตเตอร์ของขดลวดที่มีแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำอยู่ ดังภาพที่ 19

ภาพที่ 19

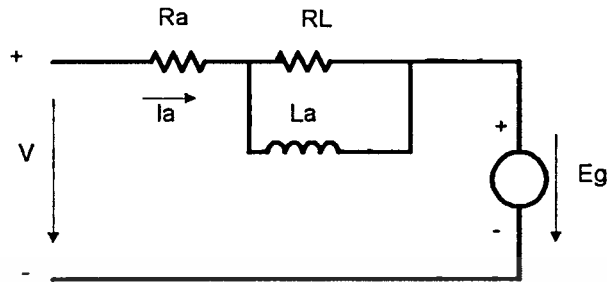


แสดงการเกิดการลัดวงจรที่ขั้วแปรงถ่าน

การลัดวงจรที่เกิดขึ้นนี้จะพบเห็นในดีซีมอเตอร์ในรูปของการเกิดประกายไฟที่ขั้วของแปรงถ่าน และแปรงถ่านเองก็เป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้เกิดการสูญเสีย เนื่องจากค่าความต้านทานของแปรงถ่านเอง รวมทั้งค่าความต้านทานไฟฟ้าอันเกิดจากการสัมผัสระหว่างแปรงถ่านกับซี่ของคอมมิวเตเตอร์ อีกทั้งความเรียบผิวของคอมมิวเตเตอร์ด้วย ซึ่งสิ่งต่าง ๆ เหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดถึงประสิทธิภาพของมอเตอร์ รวมทั้งการดูแลรักษาด้วย ด้วยเหตุนี้จึงมีการพัฒนาดีซีมอเตอร์ขึ้นมาใหม่ โดยไม่มีการใช้แปรงถ่าน เรียกว่า “ดีซีมอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่าน” (DC Brushless motor)

คุณสมบัติของดีซีมอเตอร์แบบมีแปรงถ่านที่มีขั้วแม่เหล็กเป็นแบบแม่เหล็กถาวร เราสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลทางไฟฟ้า โดยเงื่อนไขว่าเมื่อเราป้อนแหล่งจ่าย  $V$  ที่มีค่าคงที่เข้าที่ขั้วของมอเตอร์ ทำให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วที่จะเข้าหาค่าคงที่ ภายใต้เงื่อนไขในการไต่ระดับของความเร็วของมอเตอร์ จะสามารถเขียนวงจรสมมูลในรูปของอิมพีแดนซ์ได้ดังภาพที่ 20 โดยมีผลของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ  $E_b$  (back emf) ที่จะต้านการไหลของกระแส  $I_a$

ภาพที่ 20



แสดงวงจรสมมูลย์ของคีมอเตอร์แบบมีแปรงถ่าน

โดยที่ เมื่อ  $R_a$  = ค่าความต้านทานส่วนวงจรไฟฟ้าของมอเตอร์

$L_a$  = เป็นค่าอินดักแตนซ์ที่เกิดจากขดลวดของอาร์มาเจอร์

$R_L$  = เป็นค่าความต้านทานที่ใช้แสดงทดแทนค่าความสูญเสียในส่วนของสนามแม่เหล็ก ในแกนเหล็ก ซึ่ง ค่า  $R_L$  นี้จะมีค่าสูงกว่า ค่า  $R_a$  อยู่ในช่วง 5-10 เท่า ทำให้สามารถตัดทิ้งค่า  $R_L$  ออกจากวงจรในขณะที่ทำการวิเคราะห์ในวงจรไฟฟ้าได้ ส่วนค่า  $L$  นี้จะส่งผลในขณะที่มอเตอร์หมุนได้ระดับขึ้นหรือลดระดับลง หรือมีการเปลี่ยนแปลงของภาระ และจะไม่แสดงผลออกมาในขณะที่มอเตอร์หมุนที่ความเร็วที่เสถียร แสดงสมการของวงจรสมมูลในฟังก์ชันของเวลาดังนี้

$$V = L_a \frac{dI_a}{dt} + R I_a + E_g \quad (24)$$

เมื่อ  $E_g$  เป็นแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นภายในขดลวดอาร์มาเจอร์ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความเร็วของมอเตอร์ด้วย  $W$

$$E_g = k_E \omega \quad (25)$$

แทนค่า  $E_g$  ในสมการที่ (25) ลงในสมการที่ (24) จะสามารถเขียนสมการใหม่ได้ในฟังก์ชันของเวลา ซึ่งจะเป็นสมการทางไฟฟ้าของมอเตอร์

$$V = La \frac{dJ_a}{df} + RI_a + k_E \Omega \quad (26)$$

จากสมการที่ 26 เมื่อมอเตอร์หมุนที่ความเร็วเสถียร และการเปลี่ยนแปลงของกระแสจะไม่มี และส่วนที่ทำให้เกิดแรงบิดหมุนที่เพลลาของมอเตอร์จะเกิดขึ้นในส่วนของ  $E_g I_a$  จะได้สมการของแรงบิดหมุนทางไฟฟ้าดังนี้

$$T_q = k_T I_a \quad (27)$$

เมื่อ  $T_q$  คือ ค่าแรงบิดหมุนทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในอาร์มาเจอร์ (OZ-in)  
 $k_T$  เป็นค่าคงที่ของแรงบิดหมุนของมอเตอร์ มีหน่วยเป็น OZ-in ต่อแอมป์

เมื่อนำเอาค่าแรงบิดหมุนที่เกิดจากความเสียด ( $T_F$ ) และค่าของการเค็มปิ้งของอาร์มาเจอร์ (DW) มาคิดในส่วนของการขับภาวะที่เพลลาของมอเตอร์ ให้ค่าแรงบิดหมุนของภาวะเป็น ( $T_L$ ) จะสามารถหาสมการความสัมพันธ์ทางกล เมื่อมีการหมุนที่ความเร็วคงที่

$$T_q = T_F + DW + T_L \quad (28)$$

จากสมการที่ 26 และ 27 เราสามารถหาค่าความสัมพันธ์ของแรงบิดหมุนที่เพลลาต่อความเร็วของมอเตอร์ เมื่อมอเตอร์หมุนที่ความเร็วคงที่

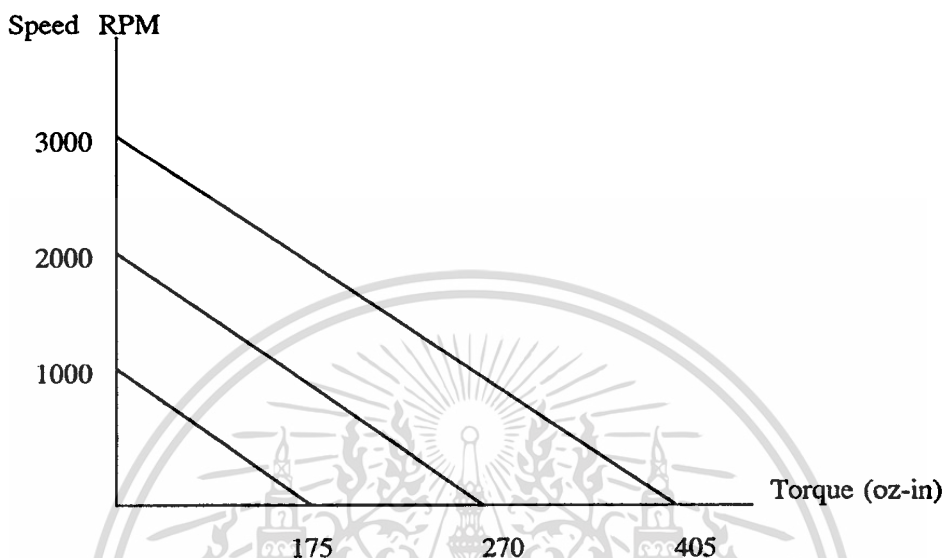
$$V = \frac{T_q R}{k_T} + k_E \Omega \quad (29)$$

$$\Omega = k.V - k_1 T_q \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } k &= 1/k_E \\ k_1 &= R/k_T k_E \end{aligned}$$

ซึ่งจะได้คุณสมบัติของดีซีมอเตอร์แบบขั้วแม่เหล็กถาวร ดังภาพที่ 21

ภาพที่ 21



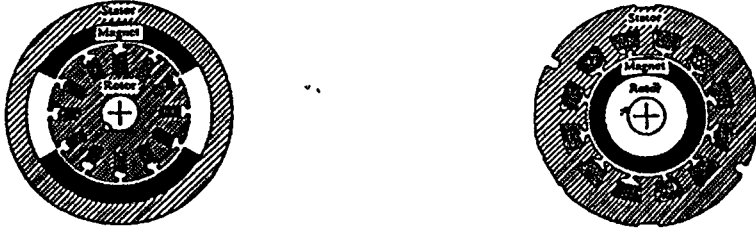
แสดงคุณสมบัติของแรงบิดหมุนต่อความเร็วเมื่อจ่ายไฟให้กับมอเตอร์มีค่าต่าง ๆ กัน

### ดีซีมอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่าน (DC Brush Less Motor)

จากที่กล่าวมาแล้วว่าดีซีมอเตอร์เป็นมอเตอร์ที่ให้คุณสมบัติของแรงบิดหมุนต่อความเร็วที่เป็นเชิงเส้น ซึ่งดีกว่าอินดักชันมอเตอร์ แต่จะมีปัญหาในส่วนของแปรงถ่าน ที่ทำให้เกิดการสูญเสียทำให้อายุการใช้งานสั้น ฯลฯ ในปัญหาเหล่านี้ถ้าเราสามารถทำมอเตอร์ดีซีโดยไม่มีแปรงถ่านได้ก็จะสามารถแก้ปัญหาได้ โดยที่ปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ มีการพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็วและมีความสามารถมากขึ้น เราจึงนำเอาเทคโนโลยีทางอิเล็กทรอนิกส์เข้ามาช่วยเสริมพร้อมกับมีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของดีซีมอเตอร์บางส่วน เราก็สามารถที่จะสร้างดีซีมอเตอร์แบบไม่มีขั้วแปรงถ่านขึ้นมาได้

หลักการทำงานของดีซีมอเตอร์แบบไม่มีขั้วแปรงถ่าน จะมีการทำงานเหมือนกับดีซีมอเตอร์ แต่มีการสลับเอาขดลวดอาร์มาเจอร์ไปไว้ที่ส่วนสเตเตอร์ และนำเอาขั้วแม่เหล็กถาวรมาเป็นส่วนที่เคลื่อนที่แทน ดังภาพที่ 22

ภาพที่ 22



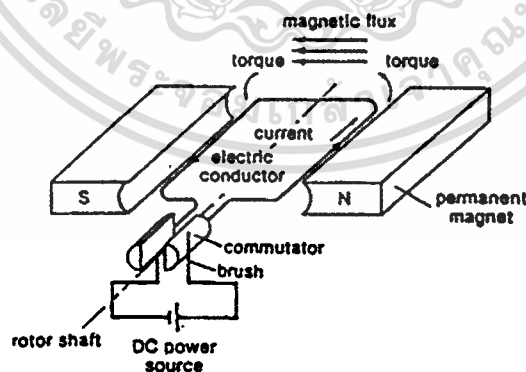
ก. ดีซีมอเตอร์แบบมีแปรงถ่าน

ข. ดีซีมอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่าน

ภาพตัดขวางของดีซีมอเตอร์ทั้งสองแบบ

จากการทำงานของดีซีมอเตอร์แบบมีแปรงถ่าน เราจะจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปที่ขดลวดตัวนำที่เคลื่อนที่ซึ่งเรียกว่า อาร์มาเจอร์ โดยผ่านเข้าที่คอมมิวเตเตอร์โดยผ่านแปรงถ่าน ซึ่งในขดลวดตัวนำนี้จะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาหลักกับเส้นแรงแม่เหล็กที่อยู่กับที่ทำให้มอเตอร์สามารถหมุนไปได้ เมื่อขดลวดหมุนไป 150 องศา คอมมิวเตเตอร์จะทำหน้าที่เปลี่ยนขั้วขดลวดที่ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าเพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กในขดลวด มีทิศทางที่ทำให้เกิดแรงบิดหมุนต่อเนื่องไป ตามภาพที่ 23

ภาพที่ 23

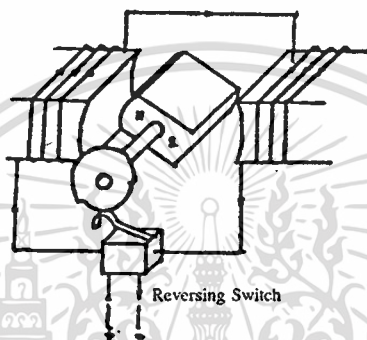


แสดงหลักการทำงานพื้นฐานของดีซีมอเตอร์แบบมีแปรงถ่าน

ในทางกลับกันถ้าเราแทนที่ขดลวดที่หมุนอยู่ด้วยแท่งแม่เหล็กถาวรและส่วนที่เป็นแท่งแม่เหล็กถาวรจะพันขดลวดให้ทำงานเป็นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยที่ขดลวดที่พันอยู่จะใช้สวิทช์เป็นตัวเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนขั้วไฟฟ้าที่ต่อเข้ากับขดลวดนี้ และที่เพลลาของส่วนแม่เหล็กที่หมุนนั้นจะมีแคลมลูกเบี้ยวที่ กำหนดตำแหน่งของการหมุนของแม่เหล็ก และแคลมลูกเบี้ยวนี้จะเป็นตัว ไปกดสวิตช์ เพื่อให้ สวิตช์จ่ายไฟเข้าขดลวด ทำให้ขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากขดลวด มีขั้วที่เหมาะสมที่จะทำให้ มอเตอร์หมุนได้อย่างต่อเนื่องดังภาพที่ 24

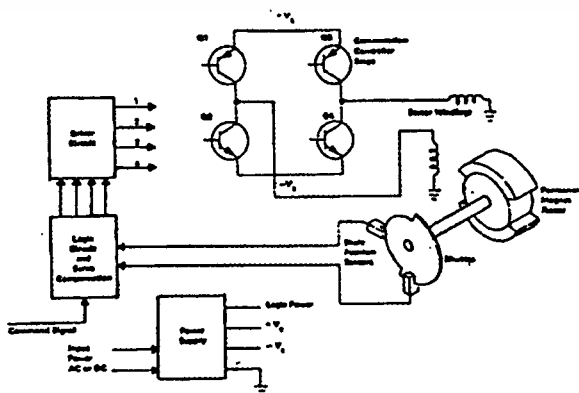
ภาพที่ 24



แสดงหลักการพื้นฐานของดีซีมอเตอร์แบบ ไม่มีแปรงถ่าน

แต่ในทางปฏิบัติแล้วสวิตช์ที่เปลี่ยนขั้วแม่เหล็กจะทำงานด้วยแรงทางกล ซึ่งเป็น อุปกรณ์ที่ให้ความเชื่อถือไม่ได้ ดังนั้น จึงมีการนำเอาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ามาทำงานแทนที่ดัง ภาพที่ 25

ภาพที่ 25



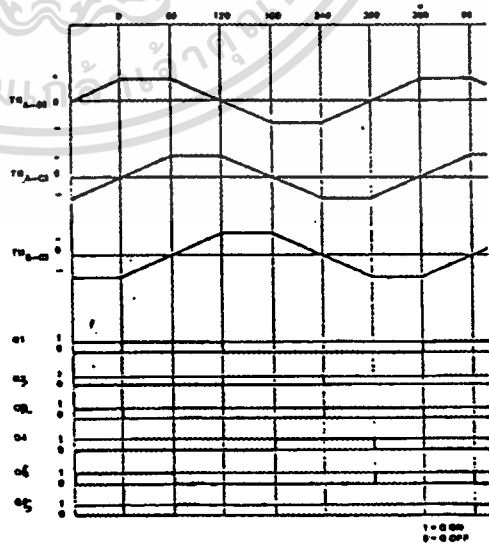
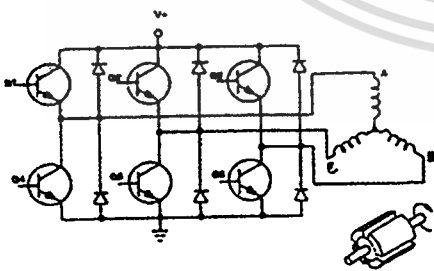
แสดงการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาใช้ควบคุมดีซีมอเตอร์แบบ ไม่มีแปรงถ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือมีลิขสิทธิ์เพื่อการค้า การพิมพ์ หรือมีลิขสิทธิ์ในรูปแบบอื่นใด การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารหรือผู้ถือลิขสิทธิ์ถือว่าผิดกฎหมาย

เพื่อควบคุมการจ่ายกระแสไฟเข้าขดลวดสนามแม่เหล็ก 2 ชุด เราจะใช้ทรานซิสเตอร์ 4 ตัว โดยที่ส่วนของโรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร และใช้ออฟไดส์วิตช์เป็นอุปกรณ์สำหรับตรวจสอบตำแหน่งของโรเตอร์ แล้วส่งกลับไปให้กับวงจรลอจิก เพื่อสั่งงานให้ทรานซิสเตอร์ Q1-Q4 ทำงานตามตำแหน่งที่ถูกต้องของโรเตอร์ ดังนั้น จึงจะทำให้มอเตอร์หมุนไปตามทิศทางที่ต้องการและมีแรงบิดหมุนที่ดี ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์นั้น เราจะสามารถควบคุมได้โดยการสั่งงานในทรานซิสเตอร์ ให้ทำงานตามจังหวะที่เร็วขึ้นหรือช้าลง มอเตอร์ก็จะหมุนตามจังหวะที่ได้รับการสั่งการนี้

คุณสมบัติของมอเตอร์ดีซีแบบไม่มีแปรงถ่าน เมื่อแบ่งขดลวดที่สเตเตอร์ออกเป็น 3 เฟส ในความเป็นจริงแล้วในโครงสร้างของสเตเตอร์จะมีช่องหลายช่อง เพื่อให้สามารถพันขดลวดลงไปตามร่องของช่องนั้น ๆ ในการพันขดลวดนี้ เราสามารถที่จะจัดกลุ่มของขดลวดออกได้ตามต้องการ เช่น ถ้าจัดเป็น 2 กลุ่ม เราจะเรียกว่า 2 เฟส ถ้าจัดเป็น 3 กลุ่ม เราจะเรียกว่า 3 เฟส ซึ่งแบบ 3 เฟสนี้จะเป็นแบบที่มีการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลายและสามารถพบเห็นได้ในเครื่องจักรที่มีระบบควบคุมอัตโนมัติ ลักษณะของมอเตอร์แบบ 3 เฟสนี้ จะมีการวางขดลวดเหมือนกับอินดักชันมอเตอร์แบบ 3 เฟส ทั่วไป และการวางขดลวดแต่ละชุดจะห่างมุมกัน 120 องศาทางไฟฟ้าดังแสดงในภาพที่ 26

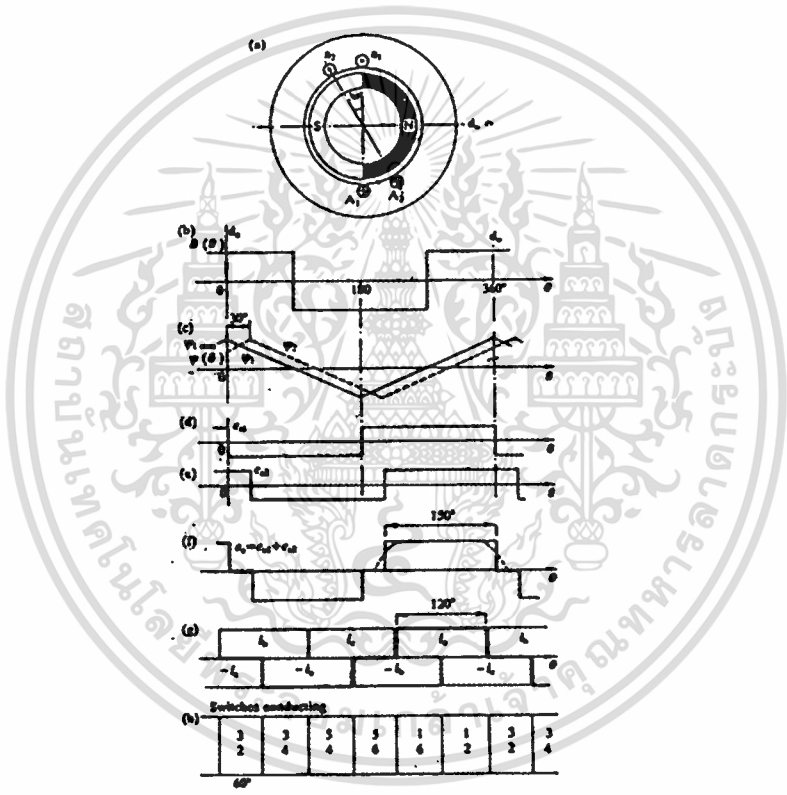
ภาพที่ 26



แสดงภาพของดีซีมอเตอร์ไม่มีแปรงถ่านแบบ 3 เฟส

ในแต่ละเฟสสามารถทำให้มีหลายขั้วแม่เหล็กได้เหมือนกับอินดักชันมอเตอร์ ซึ่งการเพิ่มจำนวนขั้วแม่เหล็กให้มากขึ้นของสเตเตอร์นี้ ย่อมหมายถึงการเพิ่มขั้วแม่เหล็กให้กับโรเตอร์ด้วยเช่นกัน ในการควบคุมมอเตอร์แบบ 3 เฟสนี้จะใช้ทรานซิสเตอร์ 6 ตัวต่อเป็นวงจรฟูลเวป และมีการควบคุมการทำงานของทรานซิสเตอร์ทั้ง 6 ตัว นี้อย่างเหมาะสมจึงจะทำให้การทำงานของมอเตอร์มีประสิทธิภาพให้ความเร็วและ แรงบิดหมุนที่ดีดังแสดงไว้ในภาพที่ 27

ภาพที่ 27



แสดงการเกิดแรงบิดหมุนเมื่อควบคุมการทำงานของทรานซิสเตอร์

ทรานซิสเตอร์ที่จ่ายไฟให้กับขดลวดจะทำงานแบบออน-ออฟ ซึ่งการจ่ายไฟให้ขดลวดนี้เป็นลักษณะของพัลส์ไฟดิซี ดังได้แสดงไว้ในภาพที่ 27 จากภาพที่ 27 (a) แสดงดีซิมอเตอร์แบบไม่มีขั้วแปร่งถ่าน ซึ่งมีขั้วแม่เหล็ก 2 ขั้วอยู่ที่โรเตอร์จึงทำให้เกิดความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในช่องอากาศระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์ดังภาพที่ 27 (b) ในส่วนของสเตเตอร์จะมีช่องสำหรับให้พันขดลวดอยู่ 12 ช่อง การพันขดลวดจะพัน 2 ขดลวดต่อ 1 เฟสต่อขั้วแม่เหล็ก โดยให้ขดลวดทั้งสองเป็น  $A_1$  และ  $A_2$  ขณะที่มีการสั่งให้ทรานซิสเตอร์จ่ายไฟเข้าขดลวด  $A_1$  ทำให้เกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นแรงแม่เหล็ก  $\mathcal{O}$  ซึ่งจะทำให้เกิดแรงบิดหมุนขึ้นที่โรเตอร์ดังแสดงไว้ในภาพที่ 27 (c) ในขณะที่โรเตอร์หมุนไป จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวด  $A_1$  และ  $A_2$  ตามลำดับ โดยการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้จะเกิดโดยทำมุมต่างกันตามองศาของการวางขดลวด ดังแสดงไว้ในภาพที่ 27 (d) และ (e) โดยจะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  $e_{a1}$  และ  $e_{a2}$  ตามลำดับเนื่องจากขดลวด  $A_1$  และ  $A_2$  ต่อกันจึงทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้ารวมดังแสดงในภาพที่ 27 (f) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าสามารถหาได้จากสมการ

$$e_{a1} = 2N_1 B_g l r_1 \omega$$

$$e_{a2} = 2N_2 B_g l r_1 \omega$$

$$e_a = e_{a1} + e_{a2}$$

$$e_{a1} = 4NB_g l r_1 \omega$$

เมื่อ  $N_1, N_2$  เป็นจำนวนขดลวดของแต่ละขดในแต่ละเฟส

$B_g$  เป็นความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในช่องอากาศ

$r_1$  เป็นรัศมีของโรเตอร์

$l$  เป็นความยาวของการเดินของเส้นแรงแม่เหล็กจากโรเตอร์ผ่านสเตเตอร์ของแต่ละคู่ของขั้วแม่เหล็ก

$\omega$  เป็นความเร็วเข้ามุมในการหมุนของโรเตอร์

จะพบว่าการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำไปขดลวดสเตเตอร์เนื่องจากการหมุนของโรเตอร์จะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ดังแสดงในภาพที่ 27 (f) และเมื่อพิจารณาจังหวะการทำงานของทรานซิสเตอร์ที่จ่ายกระแสเข้าขดลวดมอเตอร์ จะสลับการทำงานของทรานซิสเตอร์ทุก 60 องศาทางไฟฟ้า ถ้าสังเกตการไหลของกระแสที่เข้าสู่ขดลวดทั้ง 3 เฟส จะพบว่ากระแสแต่ละเฟสจะทำมุมกัน  $120^\circ$  ทางไฟฟ้าซึ่งจะมีสภาพเหมือนกับมอเตอร์ 3 เฟสแบบสมดุลย์

ในการทำงานของทรานซิสเตอร์ในทุกช่วงเวลาจะพบว่ามีจังหวะการสลับตัวในการทำงานเพื่อจ่ายกระแสเข้าขดลวดของมอเตอร์ 2 ขดลวดเสมอ ซึ่งจะทำให้การเกิดแรงบิดหมุนที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสของเฟส  $A_1$  เป็นแรงบิดหมุนที่เกิดจากขดลวด 2 ชุด จะหาค่ากำลังงานไฟฟ้าที่ทำให้เกิดแรงบิดหมุนได้คือ

$$P_{em} = \omega T_{em}$$

$$P_{em} = 2eI \quad (31)$$

เป็นกำลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากการรวมของขดลวด 2 ขด

$$T_{em} = 8NB_g r_1 I \quad (32)$$

$I$  เป็นกระแสที่ไหลเข้าขดลวดเมื่อทรานซิสเตอร์ทำงานของเวลาต่าง ๆ จากสมการ 32 เมื่อ  $N, B_g, l, r_1$  มีค่าคงที่ เราจะหาค่าความสัมพันธ์ของแรงบิดหมุนได้ด้วย

$$T_{em} = k_t I \quad (33)$$

หรือสามารถเขียนอยู่ในรูปของเส้นแรงแม่เหล็กได้

$$\begin{aligned} \emptyset &= B_g r_1 \gg l, k = 8N \\ T_{em} &= k \emptyset I \end{aligned} \quad (34)$$

$$E = k \emptyset \omega \quad (35)$$

จากสมการแรงบิดหมุนของมอเตอร์ดีซีแบบไม่มีแปรงถ่านจะเหมือนกับดีซีมอเตอร์แบบมีแปรงถ่านที่มีขั้วแม่เหล็กถาวร ดังนั้นถ้าในรูป 3.21 ถ้าเรานำมาเป็นสมการแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของมอเตอร์ในแต่ละเฟสจะได้

$$V = RI + E \quad (36)$$

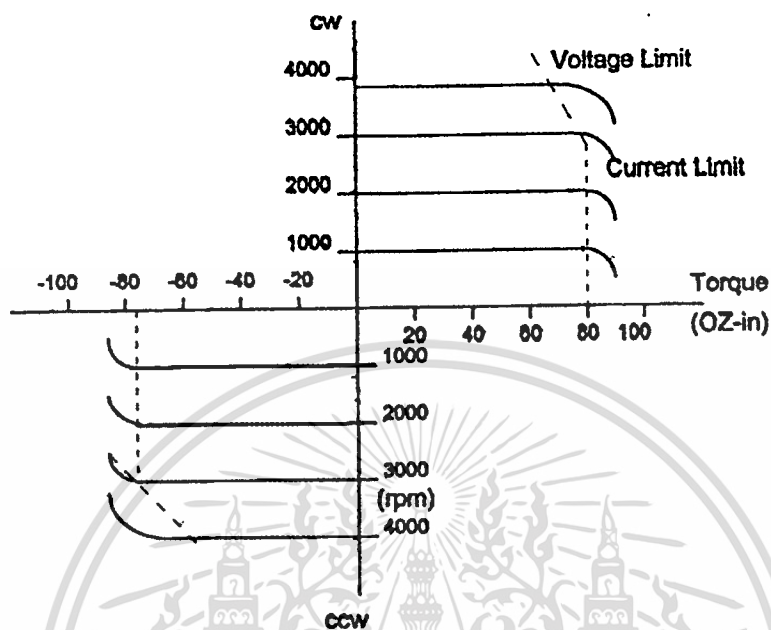
เมื่อค่า  $R$  เป็นค่าความต้านทานของขดลวด 2 เฟสรวมกัน

$E$  เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นรวมกัน 2 เฟส

$V$  เป็นแหล่งจ่ายไฟที่จะจ่ายให้ขดลวดแต่ละเฟส

เราสามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงบิดหมุนที่ความเร็วต่าง ๆ กันได้

ภาพที่ 28



แสดงความสัมพันธ์ของแรงบิดหมุนที่ความเร็วต่างกัน

แรงบิดหมุนของมอเตอร์จะมีย่านการทำงานที่คงที่อยู่ในช่วงหนึ่งแต่จะถูกจำกัดด้วยค่าแรงเคลื่อนของแรงจ่าย และค่าความต้านทานของขดลวดที่จะทำให้กระแสที่ไหลเข้ามาในขดลวดน้อยลง อีกทั้งความเร็วของมอเตอร์ทำให้  $E$  มีค่าสูงขึ้นเป็นเหตุให้กระแสที่ไหลเข้ามอเตอร้น้อยลง ดังนั้นในช่วงนี้แรงบิดหมุนจะลดลง

## บทที่ 4

### การควบคุมความเร็วของมอเตอร์

ในระบบควบคุมตำแหน่งนั้นสิ่งหนึ่งที่จะต้องนำมาประกอบการพิจารณาคือ คุณสมบัติของแรงบิดหมุนต่อความเร็วเมื่อมีการควบคุมความเร็วด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้เป็นอุปกรณ์ส่งกำลัง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้เซอร์โวมอเตอร์และอินดักชันมอเตอร์ มาเป็นอุปกรณ์ส่งกำลัง ในบทนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติของแรงบิดหมุนต่อความเร็ว เมื่อมีการควบคุมความเร็วด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

#### การควบคุมความเร็วของเซอร์โวมอเตอร์

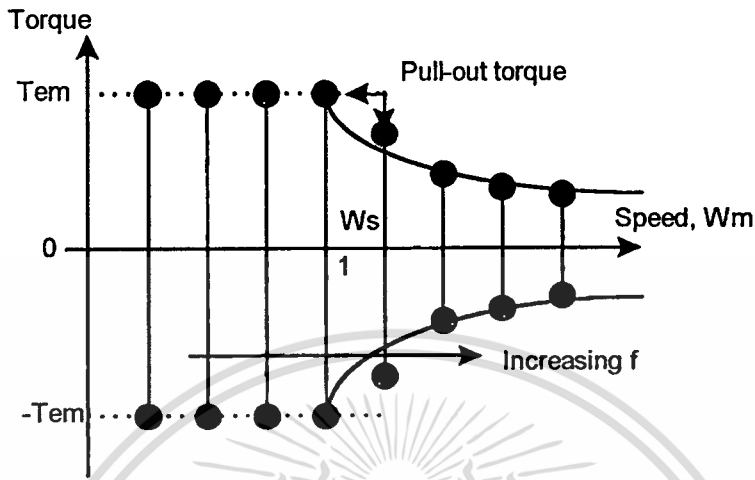
จากบทที่ 3 ได้กล่าวถึงเซอร์โวมอเตอร์ในลักษณะของดีซีมอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่านซึ่งมอเตอร์ชนิดนี้จะต้องเลือกรับพลังงานไฟฟ้าจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่จะประกอบมาเป็นชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ (Servodrive) ซึ่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะจ่ายไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ได้ 2 แบบ คือ

- 1.การจ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบพัลส์ ( Trapezoidal Waveform) ถ้าเราเลือกการจ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบนี้เราอาจจะเรียกชื่อมอเตอร์นั้นได้อีกชื่อหนึ่งว่า “ ดีซีเซอร์โวมอเตอร์ ”
- 2.การจ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบซายเวป (Sinusoidal Waveform ) ถ้าเราเลือกการจ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบนี้เราอาจจะเรียกชื่อมอเตอร์นั้นได้อีกชื่อหนึ่งว่า “ เอซีเซอร์โวมอเตอร์ ”

สำหรับงานวิจัยนี้จะเลือกอุปกรณ์ชุดจ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบซายเวปให้กับเซอร์โวมอเตอร์ ซึ่งการจ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบนี้จะให้ค่าแรงบิดหมุนที่สม่ำเสมอ ในส่วนของการควบคุมความเร็วของมอเตอร์สามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมได้ดังภาพที่29



ภาพที่ 30



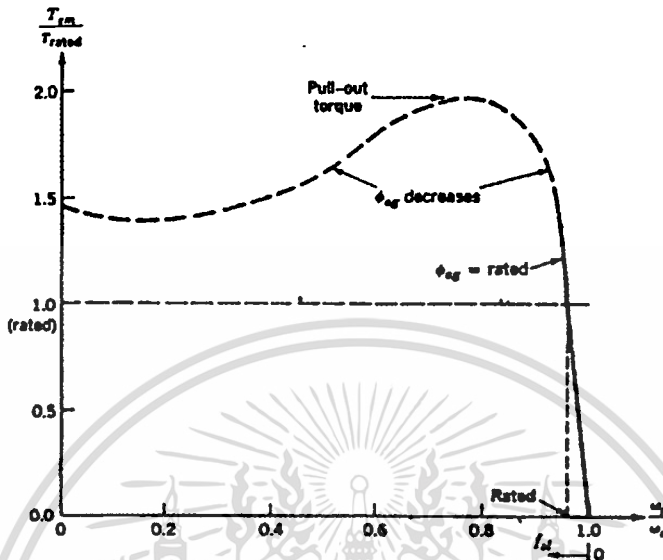
แสดงแรงบิดหมุนของมอเตอร์เมื่อทำการควบคุมความถี่ที่จ่ายให้มอเตอร์

เนื่องจากการทำงานเป็นแบบเอชไอมอเตอร์ ดังนั้นการควบคุมความเร็วของมอเตอร์จะใช้วิธีการควบคุมความถี่ที่จ่ายให้กับมอเตอร์เหมือนกับอินดักชันมอเตอร์ จึงสามารถแสดงความสัมพันธ์ของแรงบิดหมุนต่อความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปดังภาพที่ 30

#### การควบคุมความเร็วของอินดักชันมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์

จากคุณสมบัติของอินดักชันมอเตอร์ที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 จะพบว่าค่าแรงบิดหมุนในย่านที่มอเตอร์ทำงานปกติ ( $s \approx 0$ ) ที่โหลดคงที่ มอเตอร์จะหมุนที่ความเร็ว  $\omega$  ค่าสลิปค่าหนึ่ง ณ ความถี่ของแหล่งจ่ายคงที่  $f_1$  และมีแรงเคลื่อนของแหล่งจ่ายคงที่ จะได้เส้นของภาระดังกล่าว

ภาพที่ 31



ภาพแสดงความสัมพันธ์ของความเร็วมอเตอร์เมื่อมอเตอร์ขับภาระตามพิกัดของมอเตอร์

จากสมการที่ 21 แสดงค่าแรงบิดหมุนขณะที่มอเตอร์ทำงานที่สภาวะปกติ

$$T_{em} = k \left[ \frac{E_{ag}}{f} \right]^2 fsl$$

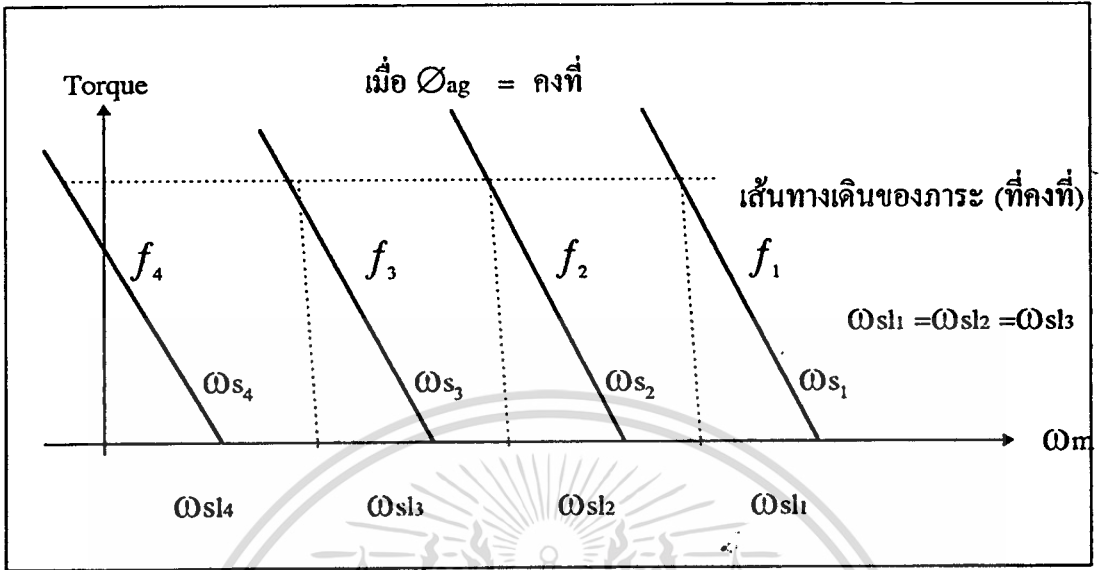
แต่ในการปรับความเร็วของอินดักชันมอเตอร์ เราจะปรับความถี่ที่จ่ายเข้ามอเตอร์ ดังนั้นเมื่อปรับความถี่  $f$  จำเป็นจะต้องปรับแรงเคลื่อนไฟฟ้า  $E_{ag}$  ตามไปด้วย โดยให้ค่า  $E_{ag}/f$  คงที่ตลอดทุกความถี่ เราสามารถหาค่าความสัมพันธ์ของ  $E_{ag}/f$  ให้อยู่ในรูปของ  $\phi_{ag}$  ได้ โดยแทนค่าในสมการที่ (7) ลงในสมการที่ (21) จะได้

$$T_{em} = k_4 \phi_{ag}^2 fsl \quad (37)$$

ฉะนั้นเพื่อรักษาค่าแรงบิดหมุนของมอเตอร์ให้คงที่ในขณะที่ปรับความเร็วด้วยการปรับความถี่ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ เราจะต้องทำการควบคุมให้เส้นแรงแม่เหล็ก  $\phi_{ag}$  คงที่ตลอดย่านการปรับความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 32



แสดงคุณสมบัติของแรงบิดหมุน-ความเร็วที่ค่าสลิป  $\approx 0$  โดยการรักษาให้

$\Phi_{ag}$  คงที่ และใช้มอเตอร์ที่ขับภาวะคงที่

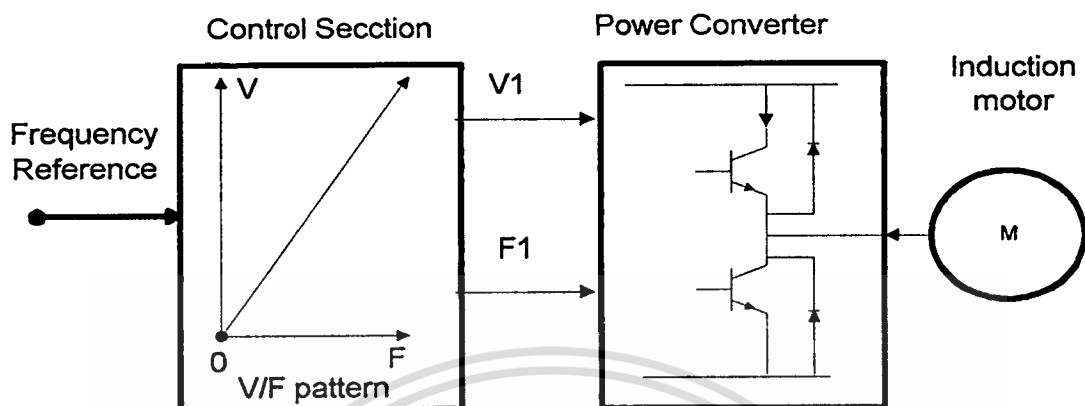
จากคุณสมบัติที่เป็นเชิงเส้นของแรงบิดหมุนต่อค่าความถี่สลิปนี้จะคงอยู่ได้ ขึ้นอยู่กับค่า  $\Phi_{ag}$  ดังนั้นในการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ควบคุมความเร็วของอินดักชันมอเตอร์ จำเป็นจะต้องออกแบบมาตามเงื่อนไขนี้ ซึ่งสามารถแบ่งชนิดของอินเวอร์เตอร์ตามลักษณะการควบคุม  $\Phi_{ag}$  ออกได้เป็น 2 วิธีคือ

1. การควบคุมอัตราส่วนของ แรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อความถี่
2. การควบคุม  $\Phi_{ag}$  โดยการควบคุมกระแสที่ไปสร้างสนามแม่เหล็ก ( $I_m$ ) ซึ่งเรียกอย่างหนึ่งว่าการควบคุมแบบเวกเตอร์

### อินเวอร์เตอร์แบบคุมสัดส่วนของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อความถี่

การทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบนี้จะใช้หลักการของ Pulse width modulated inverters ที่จะเปลี่ยนไฟกระแสตรงให้เป็นไฟกระแสสลับ 3 เฟส และมีวงจรควบคุมอัตราส่วนของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อความถี่ ( $V/f$ ) ดังไดอะแกรมต่อไปนี้

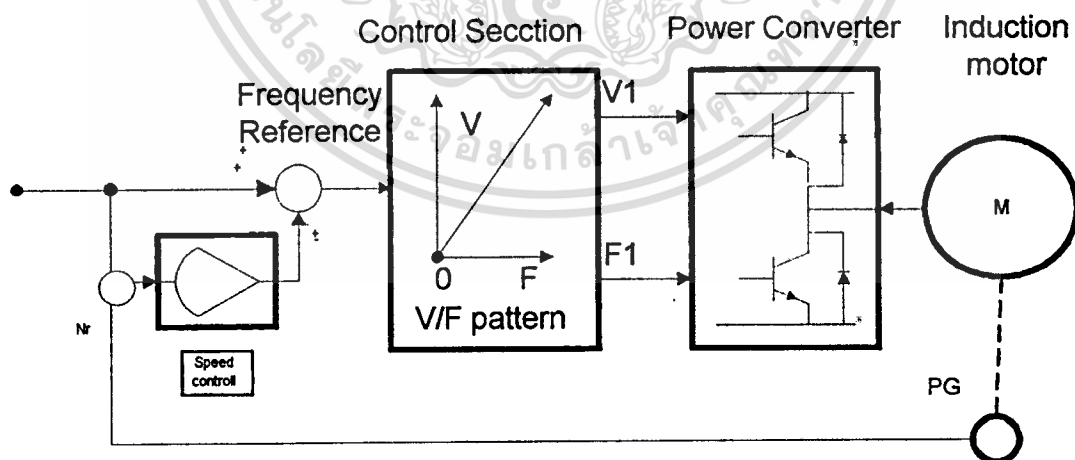
ภาพที่ 33



แสดงบล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบ V/f

ในการควบคุมแบบ V/f นี้ ได้มีการพัฒนาขึ้นมาโดยการเพิ่มชุดควบคุมความเร็วของมอเตอร์ โดยการต่อ PG ที่เพลของมอเตอร์และป้อนสัญญาณกลับมาที่อินเวอร์เตอร์ เพื่อให้อินเวอร์เตอร์ปรับความเร็วให้ถูกต้องดังบล็อกไดอะแกรมข้างล่างนี้

ภาพที่ 34



แสดงบล็อกไดอะแกรมของอินเวอร์เตอร์ที่ทำงานในระบบ V/f โดยมีสัญญาณป้อนกลับ

ในการทำงานในแบบ V/f นี้ขึ้นอยู่กับรูปแบบของสัดส่วนของ V/f ซึ่งอาจ มีรูปแบบต่างกันไปแล้วแต่ผู้ใช้งานเป็นผู้เลือกแต่จะมีสิ่งหนึ่งที่เกิดขึ้นในวิธีการนี้คือ ที่  $\omega$  ค่าความถี่ต่ำ ๆ  $\leq 1.3$  Hz อินเวอร์เตอร์จะไม่สามารถสร้างแรงบิดหมุนได้ และจะหยุดโดยอัตโนมัติ ดังนั้น การควบคุมแบบ V/f นี้เหมาะสำหรับการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ที่ความเร็วสูง ๆ ความถี่ต่ำสุดในการหมุนของมอเตอร์นี้ เราเรียกว่า start up frequency

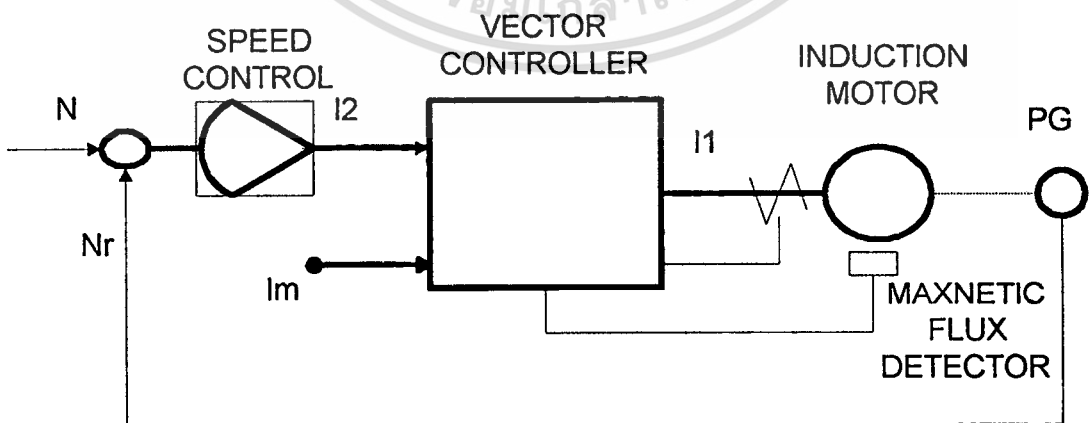
### การควบคุมความเร็วแบบควบคุมเวกเตอร์

วิธีการควบคุมเวกเตอร์จะมีอยู่ 2 วิธี คือ

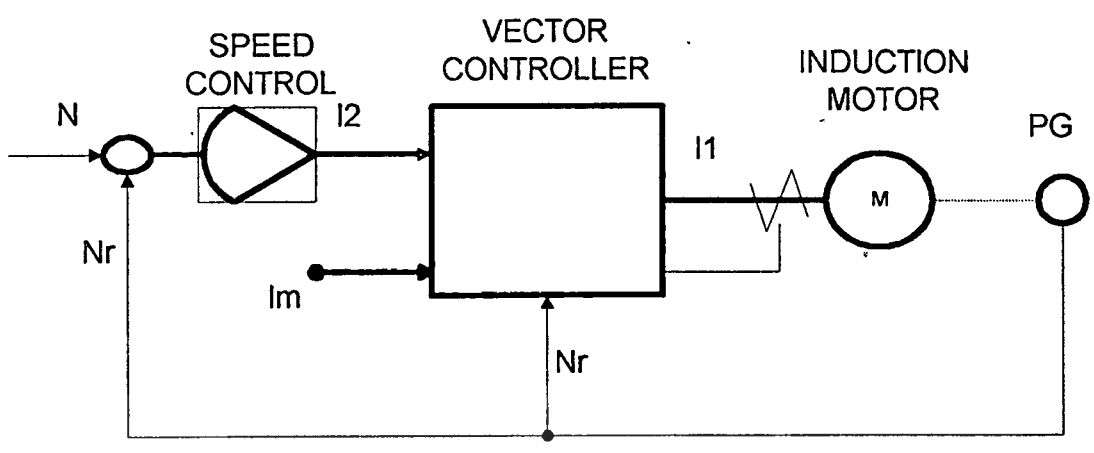
1.วิธีการควบคุมการหมุนสนามแม่เหล็ก วิธีนี้จะต้องมีอุปกรณ์ตรวจวัด เส้นแรงแม่เหล็ก (magnetic flux detector) ต่อเข้าไปภายในของอินดักชันมอเตอร์ อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้จะเป็นแนวคิดที่ดีแบบหนึ่งในการควบคุมเวกเตอร์ และไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์วัดความเร็วของมอเตอร์ แต่ถ้าเราไม่สามารถที่จะประกอบอุปกรณ์ตรวจวัดเส้นแรงแม่เหล็กเข้าไปในอินดักชันมอเตอร์ได้ วิธีการหนึ่งที่สามารถใช้ได้เป็นอย่างดีคือ การใช้วงจรสมมูลเส้นแรงแม่เหล็กภายในอินดักชันมอเตอร์มาใช้แทน ซึ่งจะให้ผลที่เท่าเทียมกัน

2.วิธีการควบคุมความถี่สลิป (fsi) จะเป็นวิธีการที่อยู่ในรูปแบบของการตรวจวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ ซึ่งเป็นวิธีการที่ถูกนำมาใช้งานมากในปัจจุบัน

ภาพที่ 35



(ก) วิธีการควบคุมการหมุนสนามแม่เหล็ก

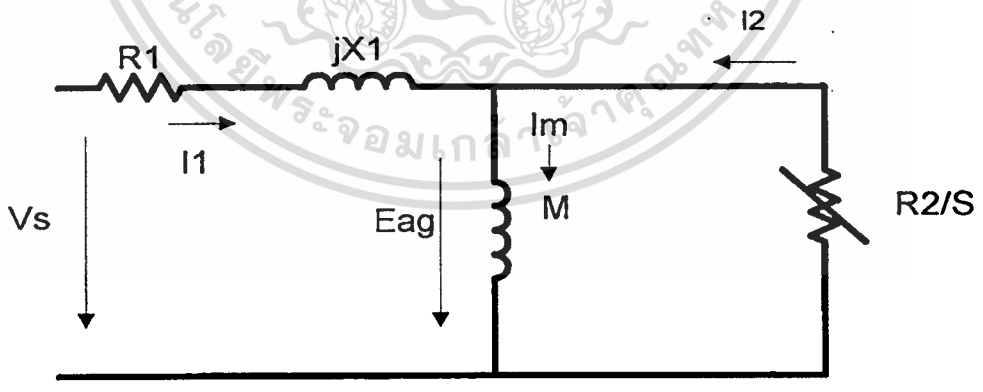


(ข) วิธีการควบคุมความถี่สลิป

แสดงบล็อกไดอะแกรมวิธีการควบคุมเวกเตอร์ทั้งสองวิธี

กล่าวได้ว่า วิธีการควบคุมเวกเตอร์เป็นวิธีการควบคุมทั้งกระแสที่เข้ามอเตอร์ ความถี่ของแหล่งจ่าย และเฟสของกระแสที่จ่ายเข้ามอเตอร์ จากที่กล่าวในส่วนของอินดักชันมอเตอร์ ถึงเรื่องกระแสที่ไหลเข้าสู่มอเตอร์ ( $I_1$ ) จะแยกเป็นกระแสในส่วนสร้างสนามแม่เหล็ก ( $I_m$ ) กระแสที่ไปสร้างแรงบิดหมุน ( $I_2$ ) และมีวงจรสมมูลทางไฟฟ้าดังภาพที่ 36

ภาพที่ 36



แสดงวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของอินดักชันมอเตอร์

จากวงจรสมมูลเราสามารถเขียนสมการกระแสได้ดังนี้

$$I_1 = \sqrt{I_m^2 + I_2^2} \tag{38}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของโรเตอร์ ค่า  $E_{ag} = I_2 R_2 / S$

$$2\pi f_1 M I_m = I_2 \frac{R_2}{S} \quad (39)$$

$$S f_1 = \frac{R_2 \times I_2}{2\pi M I_m}$$

เมื่อค่าความถี่สลิป  $f_{sl} = S f_1$  ดังนั้นจะเขียนสมการ (39) ในรูปของความถี่สลิปได้ค่าสมการ

$$f_{sl} = \frac{R_2}{2\pi M} \cdot \frac{I_2}{I_m} \quad (40)$$

และเมื่อค่า  $M/R_2 =$  เป็นค่า Secondary circuit time constant ( $\sigma_2$ ) ดังนั้นจะได้สมการที่ (40) ดังนี้

$$f_{sl} = \frac{1}{2\pi \sigma_2} \cdot \frac{I_2}{I_m} \quad (41)$$

และจากความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของแหล่งจ่ายความถี่สลิป โดยให้ค่า  $f_n$  เป็นความถี่ที่เกิดความเร็วที่เพลลาของมอเตอร์จะสามารถเขียนสมการได้

$$f_1 = f_{sl} + f_n \quad (42)$$

จากวงจรสมมูลในภาพที่ 2 เมื่อพิจารณาถึงเฟสของกระแสของ  $I_m$  และ  $I_2$  จะสามารถหามุม  $\alpha$  ของการต่างเฟสระหว่างกระแสทั้งสอง

$$\alpha = \tan^{-1} \cdot \frac{I_2}{I_m} \quad (43)$$

เมื่อพิจารณาถึงแรงบิดหมุนของมอเตอร์ในรูปของกระแสโดยการแทนค่าในสมการที่ (23) ลงในสมการที่ (21) จะได้

$$T_{em} = k_5 \frac{E_{ag}}{f_s} I_2 \tag{44}$$

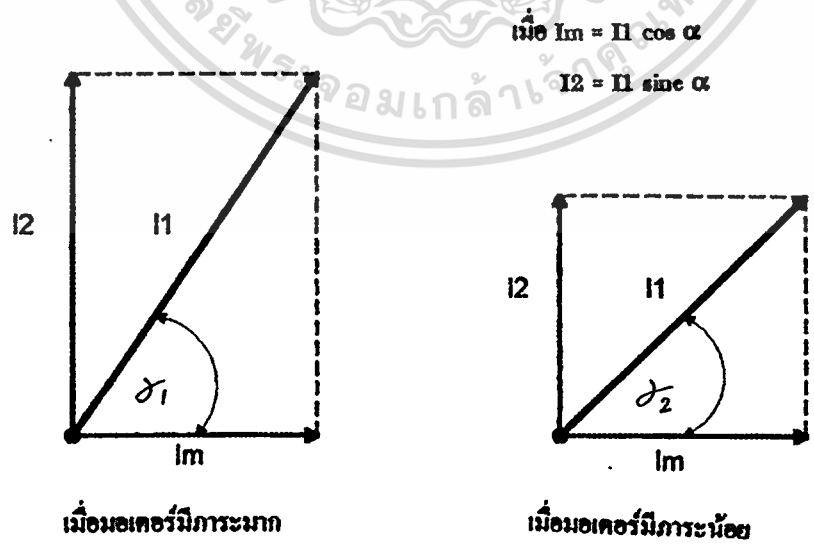
หรือแทนค่า  $E_{ag}/f_s$  อยู่ในรูปของ  $\varnothing_{ag}$

$$T_{em} = k_6 \varnothing_{ag} I_2 \tag{45}$$

**การควบคุมเว็กเตอร์แบบควบคุมความถี่สลิป**

ในการทดสอบสำหรับงานวิจัยนี้จะใช้อินเวอร์เตอร์แบบควบคุมเว็กเตอร์โดยวิธีควบคุมความถี่สลิปของมอเตอร์ ซึ่งเป็นวิธีการที่ให้ผลของแรงบิดหมุนที่ดีทุกย่านความถี่ที่จ่ายให้มอเตอร์ ทั้งยังสามารถทำให้ออเตอร์ทำงานที่ความถี่ต่ำ ๆ ขนาดไม่ถึง 1Hz ได้ โดยที่มอเตอร์ยังสามารถให้แรงบิดหมุนที่จะขับภาระให้ทำงานต่อไปได้ สาเหตุที่การควบคุมระบบนี้สามารถให้แรงบิดหมุนได้ทุกย่านความถี่ได้จะต้องรักษาให้  $\varnothing_{ag}$  คงที่ โดยการควบคุมกระแส  $I_m$  ให้คงที่ และกระแส  $I_2$  จะเปลี่ยนแปลงไปตามภาระของมอเตอร์ ฉะนั้นสามารถเขียนเว็กเตอร์โดยะแรมของกระแสได้ดังภาพ 37

ภาพที่ 37

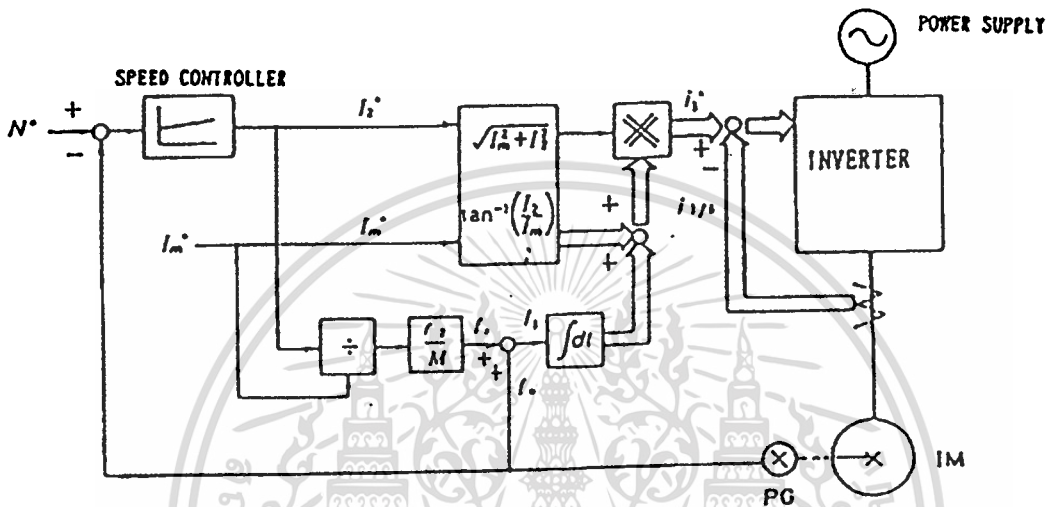


แสดงเว็กเตอร์ของกระแส  $I_m, I_2$  ที่ภาระต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากแนวทางนี้เราสามารถเขียนบล็อกไดอะแกรมในการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบควบคุมเว็กเตอร์ด้วยวิธีการควบคุมความถี่สลิปได้ดังภาพที่ 38

ภาพที่ 38

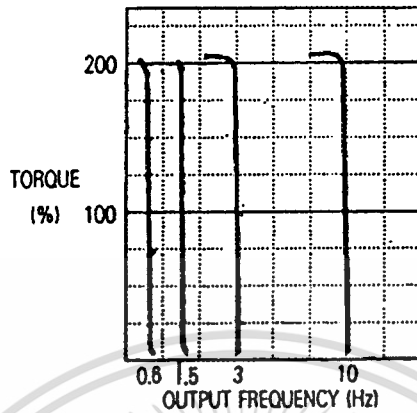


แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบควบคุมเว็กเตอร์โดยวิธีควบคุมความถี่สลิป

ในการทำงานของระบบนี้จะต้องมีการกำหนดค่ากระแสของมอเตอร์ขณะไม่มีภาระหรือกระแส ( $I_m$ ) ให้กับอินเวอร์เตอร์ แต่ต้องกำหนดค่าสลิปขณะที่มีมอเตอร์ทำงานที่ภาระเต็มที่ (ตรวจสอบจากความเร็วของมอเตอร์ขณะภาระสูงสุด) เพื่อเป็นการกำหนดเป็นค่าตัวแปรของอินเวอร์เตอร์ในการคำนวณค่า ส่วน PG ที่ใช้วัดความเร็วของมอเตอร์จะต้องมีการทำค่าเป็นพัลส์ต่อรอบ เพื่อคำนวณหาความเร็วของมอเตอร์

จากบล็อกไดอะแกรมการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบควบคุมเว็กเตอร์โดยวิธีควบคุมความถี่สลิปนี้จะให้คุณสมบัติของแรงบิดหมุน ณ ความถี่ต่ำได้ดีเหมือนที่ความถี่สูงดังภาพที่ 39

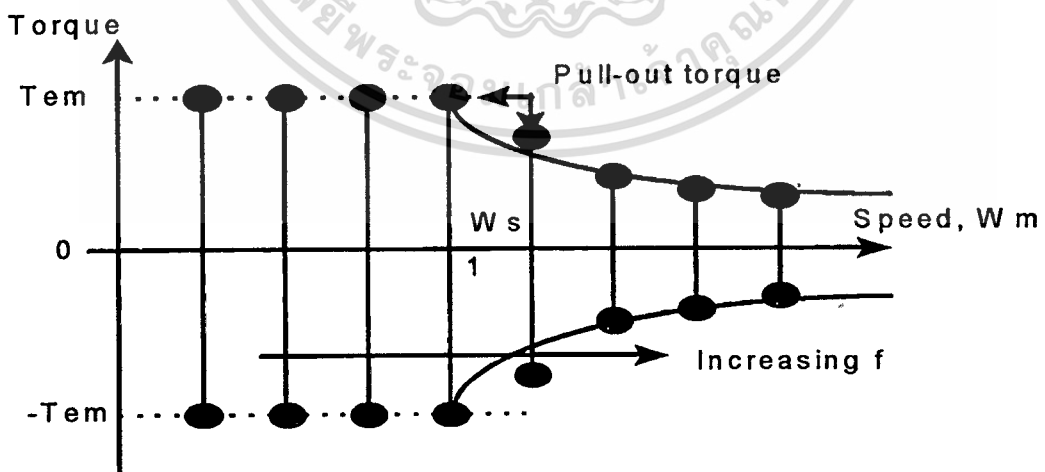
ภาพที่ 39



แสดงคุณสมบัติของแรงบิดหมุนของอินเวอร์เตอร์ ณ ความถี่ต่างกัน

จากคุณสมบัติมอเตอร์เมื่อขับด้วยอินเวอร์เตอร์แบบควบคุมเวกเตอร์โดยวิธีควบคุมความเร็วที่สลิป จะสามารถให้ค่าแรงบิดหมุนที่ภาระเต็มทีของมอเตอร์คงที่ตลอดค่าความเร็วที่สูงสุดของมอเตอร์ดังภาพที่ 40

ภาพที่ 40



แสดงคุณสมบัติของแรงบิดหมุนความเร็ว ณ ความถี่ต่างกัน

จากคุณสมบัติที่ดีของอินเวอร์เตอร์แบบควบคุมเวกเตอร์นี้จะทำให้สามารถปรับความเร็วโดยการปรับความถี่ให้กว้างขึ้น และสามารถปรับสัดส่วนของความเร็วได้ 100:1 ซึ่งเมื่อเทียบกับอินเวอร์เตอร์แบบควบคุมอัตราส่วนของ  $V/f$  ให้คงที่ ซึ่งจะมีข้อดีดังนี้

1. การปรับความเร็วจะได้กว้างกว่าและหมุนที่ความเร็วต่ำ ๆ ได้ดี
2. ให้แรงบิดหมุนที่ติดต่อด้านความเร็วรอบ
3. ให้ผลการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ

จากคุณสมบัติของแรงบิดหมุนต่อความเร็วของอินดักชันมอเตอร์ เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบควบคุมเวกเตอร์ จะมีคุณสมบัติใกล้เคียงเซอร์โวมอเตอร์ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำมาทดลองใช้ในการควบคุมตำแหน่งโดยใช้อุปกรณ์ควบคุมตำแหน่งจะนาฬิกา ซึ่งจะกล่าวถึงในบทที่ 5 และบทที่ 6 ต่อไป



## บทที่ 5

### เครื่องเจียรนัยแบบไม่ต้องหาศูนย์ (Centerless Grinding Machine)

โดยทั่วไปเราสามารถแบ่งชนิดของเครื่องเจียรนัยออกตามลักษณะการนำไปใช้งานได้ 3 ประเภท คือ

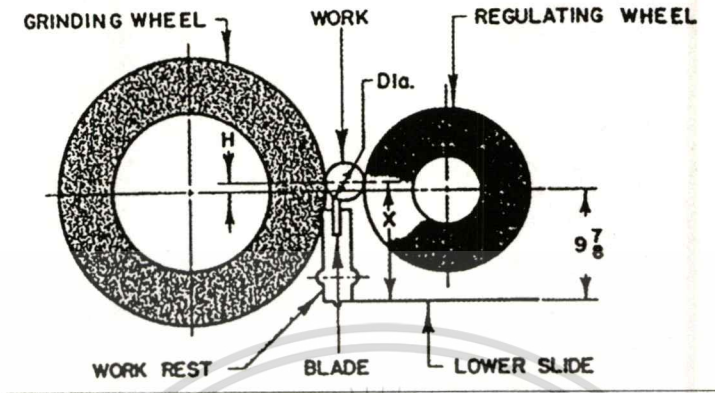
1. เครื่องเจียรราบ เป็นเครื่องเจียรที่ใช้เจียรงานที่มีลักษณะเป็นแนวราบ
2. เครื่องเจียรกลม ใช้เจียรงานที่มีลักษณะเป็น แท่งกลม
3. เครื่องเจียรแบบไม่ต้องหาศูนย์ ใช้เจียรงานที่มีลักษณะเป็นแท่งกลม และชิ้นงานจะวิ่งอย่างอิสระโดยไม่ต้องยึดศูนย์กลาง หัว หรือท้าย

แต่ไม่ว่าจะเป็นเครื่องเจียรชนิดใดก็ตาม จะมีลักษณะการทำงานที่เหมือนกันอยู่อย่างหนึ่งก็คือ ขณะทำงานจะต้องทำการป้อนหินให้ไปเจียรชิ้นงานให้ได้ขนาดตามต้องการ งานที่ใช้การเจียรนี้จะเป็นงานที่มีค่าความละเอียดของงานสูงมาก ( $\pm 0.001$  มิลลิเมตร) อีกทั้งยังต้องมีการชดเชยการสึกหรอของหินขณะทำงานอีกด้วย ฉะนั้นในปัจจุบันนี้มักจะพบว่าได้มีการนำเซอร์โวมอเตอร์ มาใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหินในการเคลื่อนเข้าหาชิ้นงาน เพื่อทำการเจียรนัยชิ้นงานให้ได้ขนาดตามต้องการ ในที่นี้จะขอกล่าวโดยละเอียดเฉพาะเครื่องเจียรนัยแบบที่ 3 คือ เครื่องเจียรนัยแบบไม่ต้องหาศูนย์เท่านั้น เนื่องจากถูกนำมาใช้เป็นชุดอุปกรณ์ทดลอง

#### โครงสร้างและหลักการทำงาน

เครื่องเจียรนัยแบบไม่ต้องหาศูนย์เป็นเครื่องเจียรนัยที่มีหินสำหรับเจียรงานอยู่ 2 ชุด ที่จะหมุนด้วยความเร็วที่ต่างกัน โดยหินเจียรชุดแรกจะมีขนาดใหญ่และจะอยู่กับที่เรียกว่า กรวยคิงวีล (Grinding Wheel) ส่วนอีกชุดหนึ่งที่เคลื่อนจะเป็นหินที่มีขนาดเล็กกว่า แต่สามารถเคลื่อนที่ได้ เรียกว่า เร็กกูเลตติ้งวีล (Regulating Wheel) โดยจะมีชิ้นงานที่ต้องการเจียรอยู่ตรงกลางระหว่างหินทั้งสองชุด และวางอยู่บนแผ่นรองรับงาน (Blade) การควบคุมขนาดของชิ้นงาน ทำได้โดยการควบคุมระยะการเคลื่อนที่ของเร็กกูเลตติ้งวีล

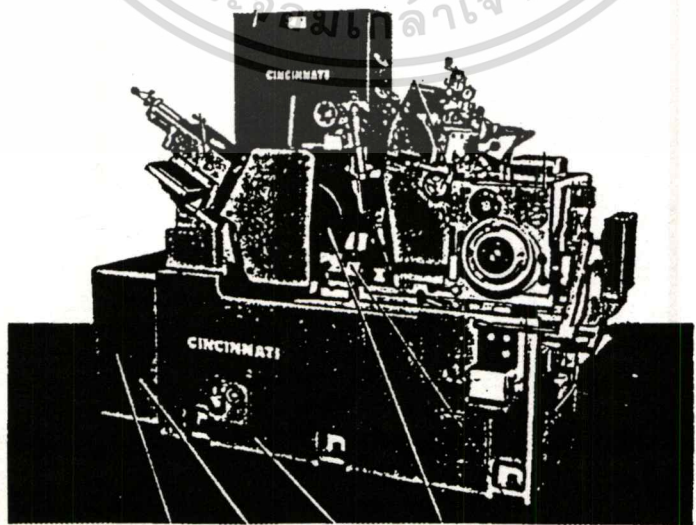
ภาพที่ 41



แสดงหลักการทำงานของเครื่องเจียรนัยแบบไม่ต้องหาศูนย์

โดยชุดหินทั้ง 2 ชุดนี้ จะประกอบอยู่บนโครงเครื่องและชุดประกอบหิน (Wheelhousing) และยังมีอุปกรณ์ช่วยส่วนอื่น ๆ อีก เช่น ชุดกรีดหน้าหิน ชุดจ่ายน้ำมันเลี้ยวระบบ แต่อุปกรณ์ที่สำคัญคือส่วนขับเคลื่อนเร็กกูเลตติ้งวีล ซึ่งใช้ลวดสกรูเป็นตัวขับเคลื่อนเร็กกูเลตติ้งวีล ให้เคลื่อนที่เข้า-ออกตามต้องการ

ภาพที่ 42

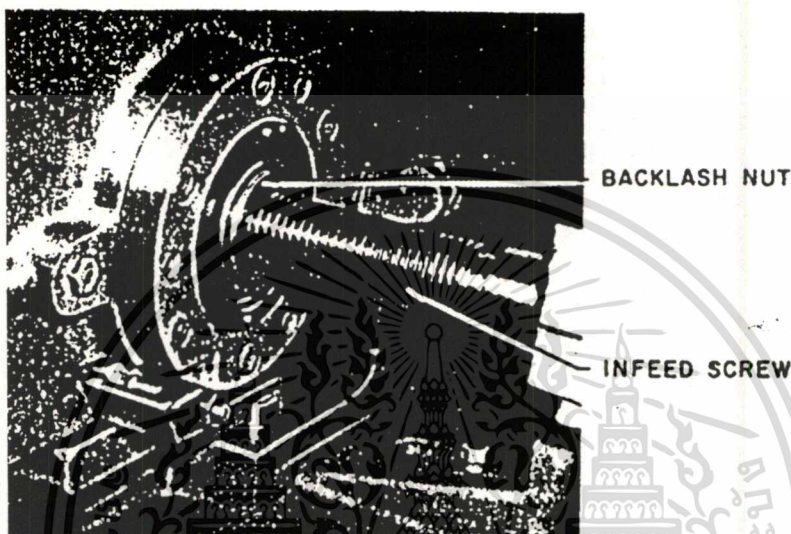


แสดงภาพของเครื่องเจียรนัยแบบไม่ต้องหาศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับส่วนของลีดสกรู ที่ใช้ขับเคลื่อนชุดของเร็กกูเลตติ้งวีลนั้น จะถูกยึดติดอยู่กับ นัต (Nut) ซึ่งนัตจะมีระบบการปรับระยะฟรี (Backlash) ในตัว

ภาพที่ 43



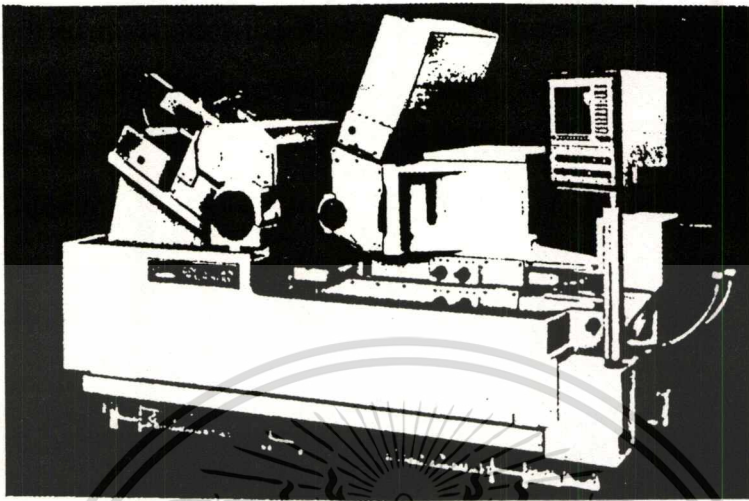
แสดงส่วนของลีดสกรู (Lead Screw)

### ระบบการควบคุมตำแหน่ง

การควบคุมตำแหน่งของเครื่องเจียรน้อยแบบไม่ต้องหาศูนย์นี้ มีจุดประสงค์เพื่อควบคุมขนาดของชิ้นงานให้ได้ขนาดตามต้องการ ซึ่งการควบคุมตำแหน่งนี้สามารถทำได้โดยการควบคุมระยะการหมุนของลีดสกรูให้หมุนไปในระยะที่กำหนด และลีดสกรูก็จะไปขับเคลื่อนเร็กกูเลตติ้งวีลให้วิ่งเข้าไปเจียรชิ้นงาน

ปัจจุบันนิยมใช้ชุดอุปกรณ์ซีเอ็นซีคอนโทรลมาเป็นอุปกรณ์ควบคุมตำแหน่งและใช้เซอร์โวมอเตอร์มาเป็นอุปกรณ์หมุนขับเคลื่อนลีดสกรู ซึ่งในการใช้งานเครื่องเจียรน้อยที่ควบคุมด้วย ซีเอ็นซีนี้ จะมีประสิทธิภาพในด้านการควบคุมตำแหน่ง และสะดวกในการตั้งระยะในการป้อนหินเข้าเจียรชิ้นงาน อีกทั้งยังง่ายต่อการตั้งระยะชดเชยการสึกหรอของหินเจียร

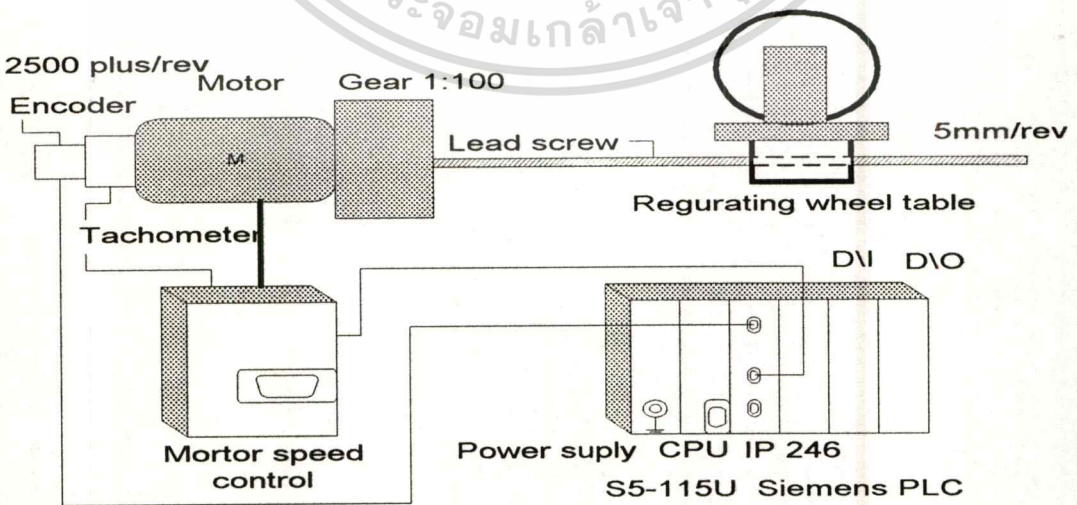
ภาพที่ 44



แสดงภาพเครื่องเจียรณัยที่ใช้อุปกรณ์ ซีเอ็นซี เป็นเครื่องควบคุม

เนื่องจากอุปกรณ์ควบคุมซีเอ็นซี และเซอร์โวมอเตอร์นั้นมีราคาแพงมาก งานวิจัยนี้จึงได้นำเอาเครื่องเจียรณัยแบบไม่ต้องหาศูนย์แบบเก่า ซึ่งมีระบบการป้อนหินเจียรณัยแบบทางกลมาดัดแปลงใหม่ โดยนำเอาระบบควบคุมอัตโนมัติเข้ามาทดแทนของเดิมที่เป็นระบบกล โดยสามารถเขียนไดอะแกรมการทำงานของระบบควบคุมได้ดังภาพที่ 45

ภาพที่ 45



แสดงไดอะแกรมของระบบควบคุมอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ชุดอุปกรณ์ควบคุมตำแหน่งอัตโนมัติ

ชุดควบคุมอัตโนมัติที่ประกอบขึ้นใหม่เพื่อใช้ในการทดสอบนี้จะใช้ PLC ของซีเมนต์รุ่น S5-115U ซึ่งมีโพซิชั่นโมดูลแบบไอพี 246 มาทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ควบคุมตำแหน่งทดแทนชุดอุปกรณ์ควบคุมซีเอ็นซี และให้เอนโคเดอร์ ซึ่งติดตั้งที่เพลาด้านท้ายของมอเตอร์เป็นตัวอ่านค่าระยะทางการเคลื่อนที่ของชุดหินเร็กกูเลตติ้งวีล ซึ่งขับเคลื่อนด้วยลีดสกรู โดยที่โพซิชั่นโมดูลจะส่งสัญญาณอนาล็อก ไปที่ชุดอุปกรณ์ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ เพื่อสั่งงานให้มอเตอร์หมุนขับเคลื่อนลีดสกรูพาชุดหินเร็กกูเลตติ้งวีล เคลื่อนที่เข้าเจียรชิ้นงานได้ตามตำแหน่งที่ต้องการ ในส่วนการขับเคลื่อนลีดสกรูด้วยมอเตอร์ เราจะใช้ชุดเกียร์ลดความเร็วของมอเตอร์ที่จะขับเคลื่อนลีดสกรูเนื่องจากในการทำงานลีดสกรูจะหมุนด้วยความเร็วที่ต่ำมาก ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดของการทำงานในแต่ละส่วนดังนี้



#### การวัดระยะทางการเคลื่อนที่ของชุดหิน

การวัดระยะทางการเคลื่อนที่ของชุดหินจะวัดได้จากเอนโคเดอร์ที่ติดตั้งที่เพลามอเตอร์ โดยที่ต้องหาระยะเกลียวของลีดสกรูเหมือนหมุนไป 1 รอบ และสัดส่วนของเกียร์ลดความเร็ว การหาค่าระยะทางที่อ่านจากเอนโคเดอร์นี้ เรียกว่า "resolution" โดยเป็นการหาค่าระยะทางเป็น (มิลลิเมตร) ต่อ 1000 พัลส์ ซึ่งจะนำไปเป็นเม็ทรีนค่าให้กับโพซิชั่นโมดูล (ไอพี 246)

$$\begin{aligned}
 \text{resolution} &= \frac{\text{ระยะเกลียวต่อรอบ} \times 1000}{i \times \text{จำนวนพัลส์ต่อรอบของเอนโคเดอร์}} & (45) \\
 &= \frac{5 \times 1000}{100 \times 2500} \\
 &= 0.02 \text{ มิลลิเมตร/1000พัลส์}
 \end{aligned}$$

เมื่อ ระยะเกลียวต่อรอบของลีดสกรู = 5 มิลลิเมตร  
 จำนวนพัลส์ต่อรอบของเอนโคเดอร์ = 2500 พัลส์  
 i = อัตราส่วนของเกียร์ลดความเร็ว 1:100

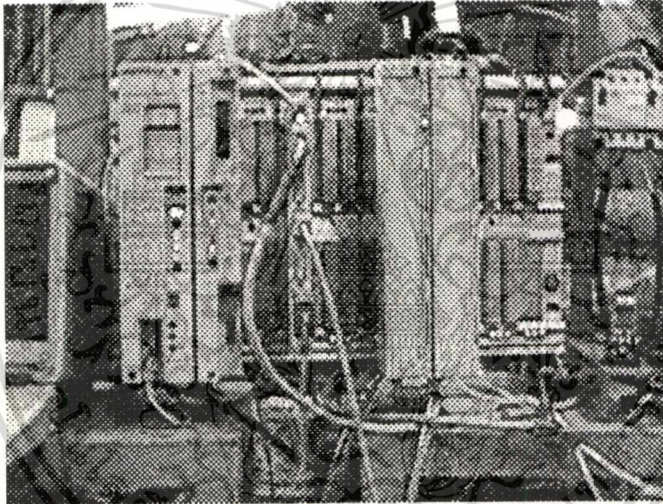
ในส่วนของเกียร์ลดความเร็วและส่วนของลีดสกรูที่ขับเคลื่อนชุดหิน มักจะมีค่าระยะฟรีในการเคลื่อนที่ (back lash) ซึ่งระยะฟรีนี้จะทำให้ค่าที่วัดได้จากเอนโคเดอร์เป็นค่าที่ไม่ถูกต้อง โดยที่ระยะฟรีนี้ทำให้ชุดหินไม่เคลื่อนที่ในขณะที่มอเตอร์หมุนพาเอนโคเดอร์ไปแล้ว ดังในอุปกรณ์ควบคุมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุมตำแหน่ง จะมีการป้อนข้อมูลให้กับโพสิชั่น โมดูล เพื่อทำการคำนวณค่าชดเชยขณะเครื่องทำงาน ในการทดสอบนี้จะมีค่าพีชของระบบเท่ากับ 17. มิลลิเมตร

### การทำงานของ PLC และโพสิชั่น โมดูล (ไอพี 246)

ในการทำงานของพีแอลซี ซีเมนต์รูน S5-115U ของชุดอุปกรณ์ควบคุมตำแหน่งนี้จะประกอบอยู่บนแร็ค ดังภาพที่ 46

ภาพที่ 46



แสดงการประกอบของซีพียู และอินพุท-เอาพุทบนแร็ค

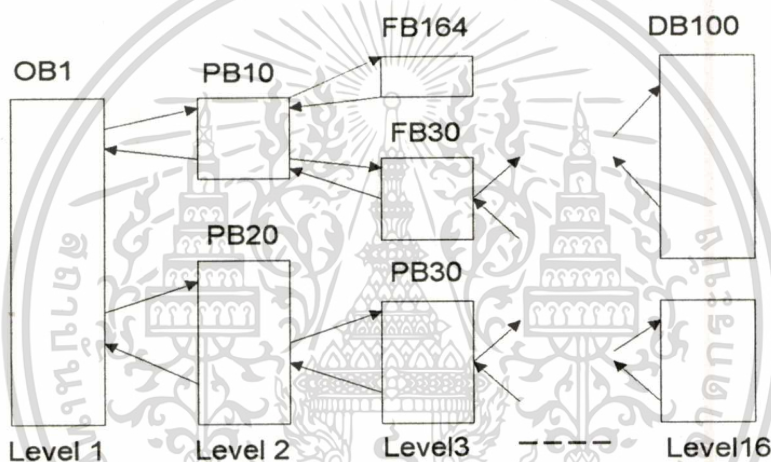
ในการจัดวาง โมดูลของพีแอลซีจะวางแหล่งจ่ายไฟไว้ซ้ายสุด ซึ่งแหล่งจ่ายไฟนี้จะจ่ายไฟให้ทุกโมดูลที่อยู่บนแร็ค อีกทั้งยังมีแบตเตอรี่ที่จะเลี้ยงหน่วยความจำทั้งของซีพียูและส่วนของโพสิชั่น โมดูล ทำให้โปรแกรมที่เราเขียนเพื่อควบคุมระบบของ พีแอลซี (แลคเตอร์โปรแกรม) และโปรแกรมของส่วนควบคุมตำแหน่งเอ็นซีโปรแกรมสามารถคงอยู่ได้เมื่อไฟฟ้าที่ต่อเข้าสู่แหล่งจ่ายด้วย ช่องที่สองจะใส่ซีพียูสำหรับควบคุมการทำงานของระบบทั้งหมด โดยซีพียูจะมองโมดูลทุกโมดูลเป็นอินพุท-เอาพุทของระบบทั้งหมด ในส่วนของซีพียูนี้จะมีการเขียน โปรแกรมซีเครนคอนโทรลใส่ไว้ในหน่วยความจำ ซึ่งเป็นโปรแกรมที่จะควบคุมการทำงานของเครื่องจักร วิธีการเขียนโปรแกรมซีเครนคอนโทรลของซีเมนต์ สามารถเขียนได้ 3 แบบ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. แบบสแต็ทमेंทลิส [statement list (STL)]
2. แบบแล็คเคอร์ไดอะแกรม [ladder diagram (LAD)]
3. แบบคอนโทรลซิสเต็มโฟลว์ชาร์ท [control system flowchart (CSF)]

และลักษณะโครงสร้างของโปรแกรมจะวางกลุ่มของโปรแกรมเป็นกลุ่มเรียกว่า บล็อก ซึ่งในแต่ละบล็อกจะมีกลุ่มของโปรแกรมซีเทรนคอนโทรลที่เขียนให้เครื่องจักรทำงานเป็นส่วน ๆ และจะมีการจัดการของบล็อก นี้ก็หนึ่งที่หนึ่งดังภาพที่ 47

ภาพที่ 47



แสดงบล็อกไดอะแกรมของกลุ่มคำสั่งของ PLC ของ ซีเมนต์

ในลักษณะการจัดการคำสั่งบล็อก คำสั่งใน OB 1. จะเรียกหากกลุ่มคำสั่งในแต่ละระดับ โดยใช้คำสั่ง JU. หรือ JC. ซึ่งระดับของคำสั่งบล็อกจะขึ้นอยู่กับชนิดของบล็อก โดยมากคำสั่งใน PB บล็อกมักจะเป็นคำสั่งลักษณะการสั่งงาน เช่น การสั่งเปิดปั๊มน้ำมันหล่อลื่น คำสั่งให้บิดหมุน คำสั่งให้ชุดโซ่ขับเคลื่อนโมดูลทำงาน รวมทั้งการตรวจสอบความผิดปกติหรือแจ้งเตือนเมื่อเงื่อนไขผิดพลาด คำสั่งใน FB บล็อกมักจะเป็นคำสั่งที่เป็นเงื่อนไขที่มีการใช้บ่อย ๆ หรือเป็นกลุ่มคำสั่งที่เป็นตัวผ่านไปติดต่อกับโซ่ขับเคลื่อนโมดูล หรืออะนาล็อกโมดูลอื่น ๆ ตัวอย่างเช่น FB 164 จะทำหน้าที่ส่งผ่านคำสั่งจากพีแอลซีไปให้โซ่ขับเคลื่อนโมดูล (ไอพี 246) เช่น สั่งให้โซ่ขับเคลื่อนโมดูล (ไอพี 246) เริ่มต้นทำงาน, หยุดทำงาน และยังเป็นกลุ่มคำสั่งที่รับสัญญาณตอบกลับของโซ่ขับเคลื่อนโมดูล (ไอพี 246) ที่ส่งกลับมาให้พีแอลซีรับทราบ เช่นการผิดพลาดที่เกิดขึ้นขณะที่โซ่ขับเคลื่อนโมดูลทำงานอยู่.สัญญาณ

เอ็มฟังก์ชันสัญญาณป้อนกลับมาให้พีแอลซีเพื่อบอกสถานะของโพชิชั่น โมดูลขณะที่ทำงาน  
อัตโนมัติหรืออยู่ในสภาวะปลดล๊อค

ภาพที่ 48

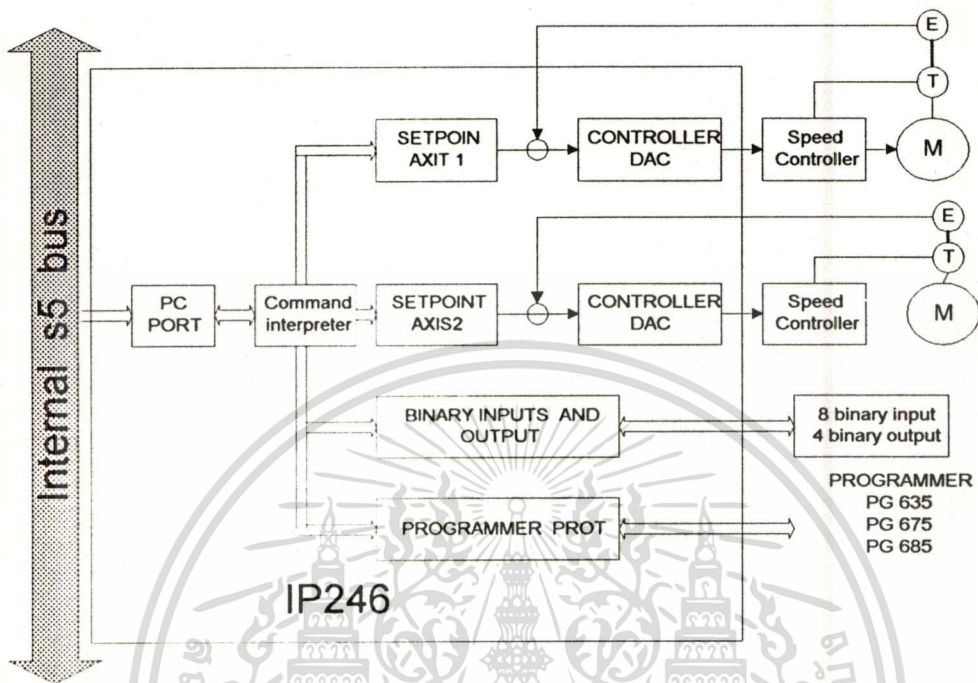
: JU FB164		FB 164	
NAME :	PER: POS		
SSDB :	IWO		
DW :	IBO	IWO	SSDB PAFE Q 0.0
BA :	IBO	IBO	DW BTR QBO
STAR :	I 0.0	IBO	BA MFKT QBO
STOP :	I 0.0	I 0.0	STAR RMLD QBO
VORW :	I 0.0	I 0.0	STOP ANZ1 QWO
STOP :	I 0.0	I 0.0	VORW ANZ2 QWQ
UEBN :	I 0.0	I 0.0	RUCK
BCD :	I 0.0	I 0.0	UEBN
PAFE :	Q 0.0	I 0.0	BCD
BTR :	QBO		
MFKT :	QBO		
RMLD :	QBO		
ANZ1 :	QWO		
ANZ2 :	QWO		

แสดงการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างพีแอลซีกับโพชิชั่น โมดูล โดยผ่าน FB 164

การแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างพีแอลซีกับโพชิชั่น โมดูลจะติดต่อผ่าน S5-bus ที่มีการต่อ  
อยู่ภายในแร็ครองรับ โมดูลอินพุท-เอาพุทของพีแอลซีดังภาพที่ 48 ส่วน ช่องบนแร็คที่เหลือจะเป็น  
ช่องสำหรับใส่อินพุทเอาพุทโมดูล โดยที่อินพุท-เอาพุทโมดูลจะมีอยู่ 2 อย่าง คือ ดิจิตอลอินพุท-ดิจิ  
ตอลเอาพุท จะทำงานเป็นสวิทช์ซึ่งจะรับสัญญาณจากสวิทช์หรือพรีอักษิมิต์สวิทช์ และส่วนเอา  
พุทจะส่งงานขั้วเบเรย์โซลินอยวาล์ว หรือหลอดไฟ ซึ่งอินพุท-เอาพุทแบบดิจิตอลนี้ จะทำงาน  
สัมพันธ์กับโปรแกรมซีเครนคอนโทรลใน PB บล็อก อนาคตอินพุท-เอาพุท เป็นโมดูลที่ใช้งานใน  
ขบวนการต่าง ๆ เช่น IP 247 จะใช้ควบคุมการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์ IP 244 จะใช้ควบคุม  
อุณหภูมิ และ IP 246 จะใช้ควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่

ในส่วนของโพชิชั่น โมดูล (ไอพี 246) จะมีวงจรสำหรับควบคุมตำแหน่ง 2 ชุดที่ทำงาน  
กันอย่างอิสระต่อกัน ซึ่งในการทดสอบนี้ จะนำมาใช้เพียง 1 ชุด เท่านั้นดังภาพที่ 49

ภาพที่ 49



### แสดงไดอะแกรมการทำงานของโพชิชั่น โมดูล

จากที่กล่าวมาแล้วว่า ซีทีแอลซี จะสั่งงานให้โพชิชั่น โมดูลทำงานหรือหยุดเท่านั้น ฉะนั้นในโพชิชั่น โมดูล จำเป็นจะต้องมีการกำหนดข้อมูลทางกลของระบบควบคุม (machine data) และลำดับขั้นตอนการเคลื่อนที่ตามลักษณะงาน (NC program) ข้อมูลทั้งสองนี้จะถูกป้อนเข้าไปเก็บไว้ในหน่วยความจำของโพชิชั่น โมดูล โดยใช้โปรแกรมเมอร์ ลักษณะของเอ็นซีโปรแกรมจะใช้รูปแบบคำสั่งของ G-Code ซึ่งมีการแสดงรายละเอียดของข้อมูลทั้งสองไว้ในภาคผนวก ข.

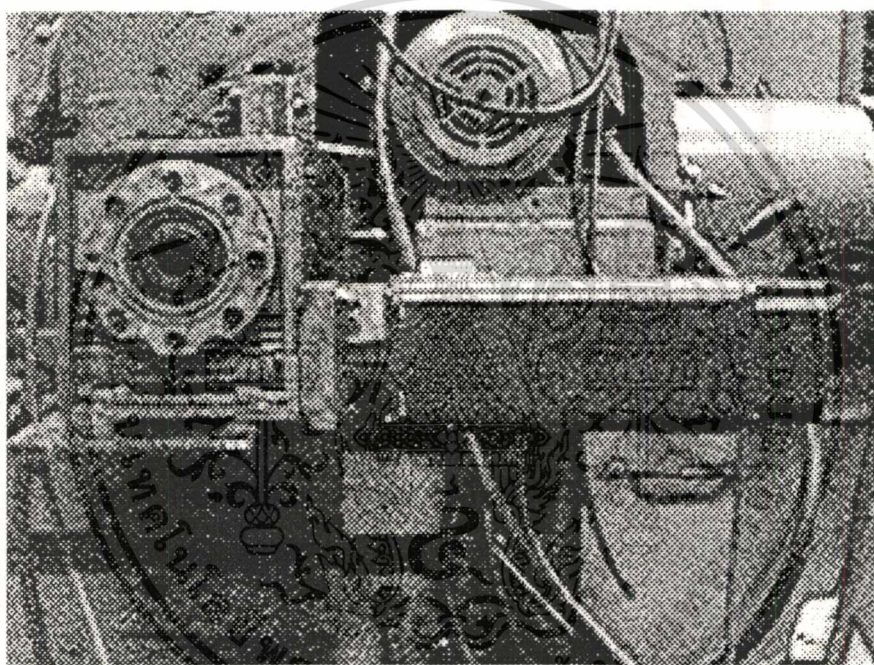
### มอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนลิคตกรู

ในการทดสอบนี้จะมีการใช้มอเตอร์ 2 แบบ เพื่อทำการเปรียบเทียบผล โดยแบบที่หนึ่งจะเป็นเอซีเซอร์โวมอเตอร์และอินดักชันมอเตอร์แบบ 3 เฟส ซึ่งมอเตอร์ทั้งสองแบบนี้ จะมีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นส่วนควบคุมความเร็ว ซึ่งจะกล่าวในลำดับต่อไป

## เอซีเซอร์โวมอเตอร์

ในการทดสอบนี้จะใช้เอซีเซอร์โวมอเตอร์ของซีเมนต์แบบ IFT5 Servomotor แสดงภาพโครงสร้างอยู่ในภาคผนวก ข รุ่น IFT5 064-1AC 71-1-2 ซึ่งจะนำมาต่อเข้ากับเกียร์ลดความเร็วที่จะไปขับลิศสกรุดังภาพที่ 50

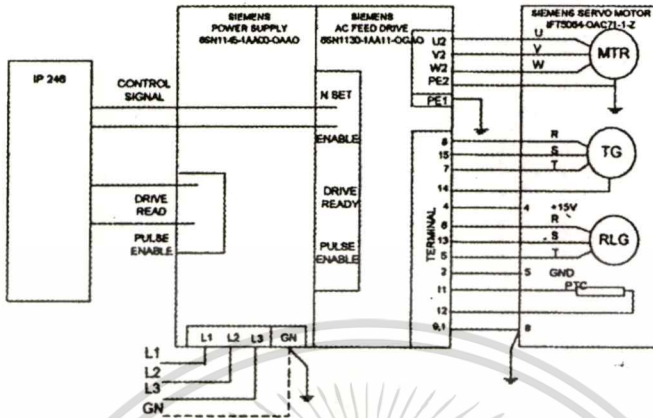
ภาพที่ 50



แสดงการต่อเซอร์โวมอเตอร์เข้ากับชุดเกียร์ลดความเร็ว

เซอร์โวมอเตอร์ของซีเมนต์จะประกอบทาโคเจนเนอร์เรเตอร์และเอ็นโคดเตอร์ที่ใช้บอกตำแหน่งของโรเตอร์ไว้ในมอเตอร์ด้วย ซึ่งในการควบคุมการหมุนของมอเตอร์จะใช้ชุด SIMODRIVE 611 ที่มีในการควบคุมแบบอนาลอก ซึ่งในที่นี้จะใช้ชุด SIMODRIVE 611 ที่ประกอบด้วยโมดูลที่เป็นแหล่งจ่ายเบอร์ 65N 1145-1AA00-0AA0 และโมดูลที่เป็นชุดควบคุมเบอร์ 65N 1130-1AA11-0GA0 นำมาประกอบใช้ร่วมกันในการควบคุมความเร็วมอเตอร์

ภาพที่ 51

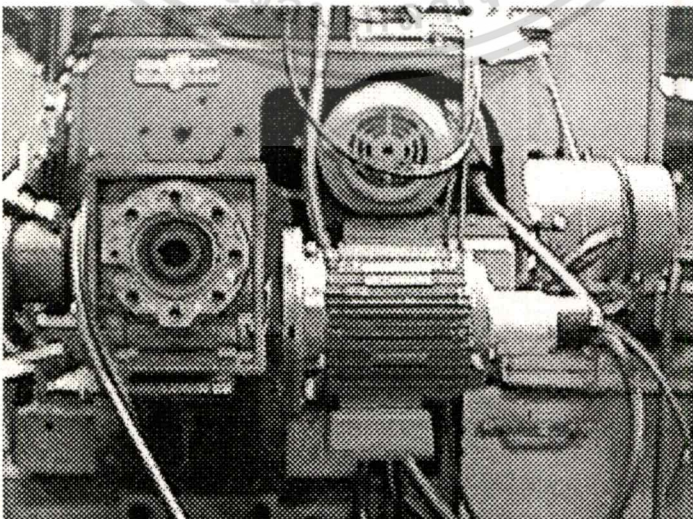


แสดงการต่ออุปกรณ์ควบคุมความเร็วของเซอร์โวมอเตอร์

อินดักชั่นมอเตอร์

ในการทดสอบนี้จะใช้อินดักชั่นมอเตอร์ 3 เฟส แบบกรงกระรอกขนาด 0.5 แรงม้า 6 ขั้วแม่เหล็กทั่วไป แต่มีการติดอินคริเมนต์เอนโคเดอร์ขนาด 2500 พัลส์ต่อรอบ เข้าไปที่เพลลาของมอเตอร์ดังภาพที่ 52

ภาพที่ 52



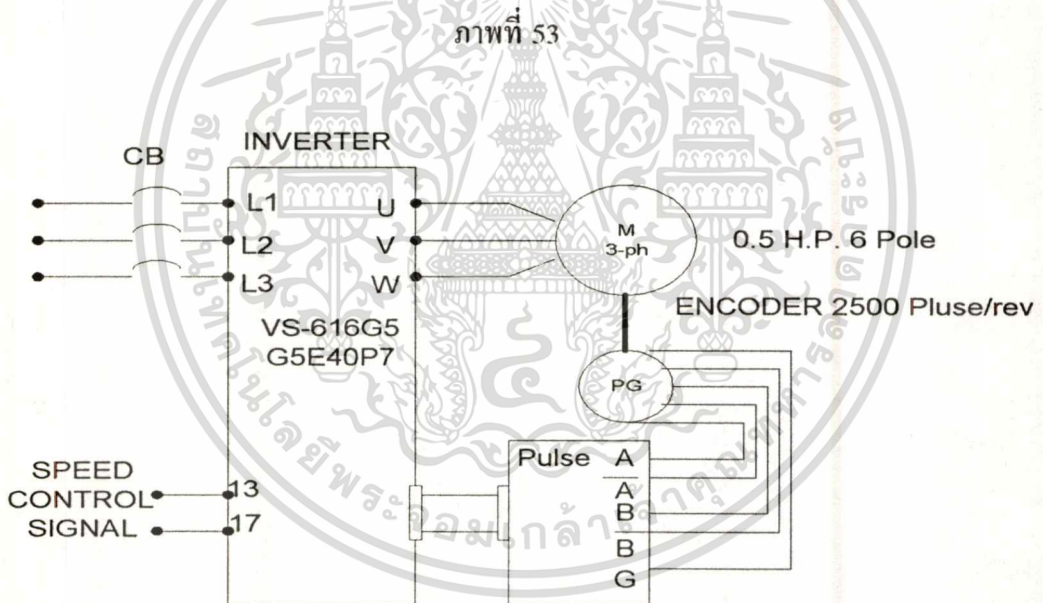
แสดงการประกอบอินคริเมนต์เอนโคเดอร์เข้ากับเพลลาของอินดักชั่นมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และในการควบคุมความเร็วของอินดัคชั่นมอเตอร์จะใช้อินเวอร์เตอร์ของยี่ห้อเวก้า แบบ VS 616G5 รุ่น G5E40P7 ซึ่งเป็นขนาด 1.1 KW และเลือกวิธีการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ได้ 2 วิธีคือ

1. การควบคุมความเร็วโดยวิธีการควบคุมอัตราส่วนของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อความถี่แบบชดเชยความเร็ว
2. การควบคุมความเร็วแบบควบคุมเวกเตอร์ของกระแสด้วยการวัดความเร็วของมอเตอร์

ดังนั้นในการต่ออินเวอร์เตอร์จะต้องมี PG Speed Control Card (PG-B2) ที่จะต้องรับสัญญาณจากเอ็นโคดเดอร์ที่ต่ออยู่ที่เพลลาของมอเตอร์ เพื่อส่งสัญญาณความเร็วและทิศทางหมุนของมอเตอร์ให้กับอินเวอร์เตอร์ ซึ่งในระบบควบคุมตำแหน่งนี้จะมีวงจรการต่อควบคุมดังภาพที่ 68



แสดงการต่อวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีการป้อนกลับความเร็ว

จากภาพที่ 53 อินเวอร์เตอร์จะรับสัญญาณควบคุมความเร็วของมอเตอร์ได้โดยการส่งสัญญาณอนาล็อก  $\pm 10V$  จากโพสิชั่นโมดูลโดยที่มอเตอร์จะหมุนตามเข็มนาฬิกาเมื่อสัญญาณควบคุมเป็นบวก และจะหมุนทวนเข็มนาฬิกาเมื่อสัญญาณควบคุมเป็นลบ และความเร็วของมอเตอร์ขึ้นอยู่กับแอมพลิจูดของสัญญาณควบคุมในที่นี้จะกำหนดไว้ที่ 10 โวลต์ จะทำให้มอเตอร์หมุนที่ 920 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### ผลของการทดลองการควบคุมตำแหน่งอัตโนมัติ

ในงานวิจัยนี้ได้นำเครื่องเจียรน้อยแบบไม่ต้องหาศูนย์มาเปลี่ยนอุปกรณ์ที่จะหมุนลีดสกรู โดยใช้เซอร์โวมอเตอร์ที่ยึดติดกับชุดเกียร์ลดความเร็ว เพื่อนำมาขับเคลื่อนลีดสกรูโดยใช้โพสิชั่น โมดูล IP 246 เป็นอุปกรณ์ควบคุมตำแหน่งที่จะสั่งงานให้เซอร์โวมอเตอร์ทำงานขับเคลื่อนลีดสกรู เพื่อเคลื่อนชุดหินให้วิ่งเข้าเจียร์ชิ้นงาน โดยใช้ เอ็น.ซี. โปรแกรม ( NC Program ) ดังนี้

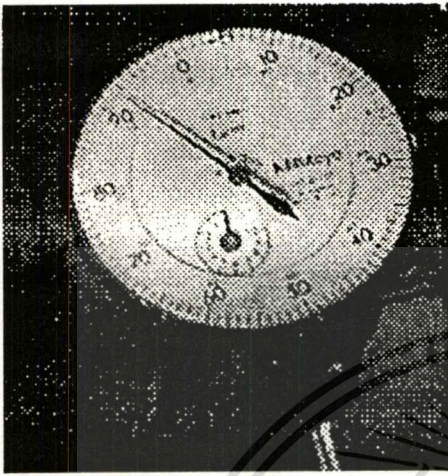
ภาพที่ 54

N10 G00 X35.000 (Max speed)  
N20 X40.000 F250 (Feed 250mm/min)  
N30 G04 F0100 (delay time 100ms)  
N40 G00 X00.000 M10 (Home position)  
N50 M02

แสดงภาพ เอ็น.ซี. โปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง

การวัดระยะทางการเคลื่อนที่ของชุดหินจะใช้เกจ ที่มีค่าความละเอียด 1  $\mu\text{m}$  วัดการเคลื่อนที่ของชุดหินที่เคลื่อนที่เข้าเจียร์ชิ้นงาน และถอยกลับเข้าตำแหน่งเริ่มต้น ซึ่งแสดงไว้ในภาพที่ 55

ภาพที่ 55



ภาพแสดงเกจที่ใช้วัดระยะการเคลื่อนที่ของการทดลอง

ในการทดสอบนี้จะกำหนดให้มอเตอร์หมุนที่ความเร็วสูงสุดเป็นระยะทาง 35 มิลลิเมตร และให้มอเตอร์หมุนที่ความเร็วต่ำต่อไปอีก 5 มิลลิเมตร ซึ่งในช่วงความเร็วต่ำนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วไป 4 ค่า คือ ที่ความเร็ว 250 มิลลิเมตรต่อนาที (ความเร็วมอเตอร์ 500 รอบต่อนาที) ที่ความเร็ว 100 มิลลิเมตรต่อนาที (ความเร็วมอเตอร์ 200 รอบต่อนาที) ที่ความเร็ว 25 มิลลิเมตรต่อนาที (ความเร็วมอเตอร์ 50 รอบต่อนาที) และที่ความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อนาที (ความเร็วมอเตอร์ 20 รอบต่อนาที)

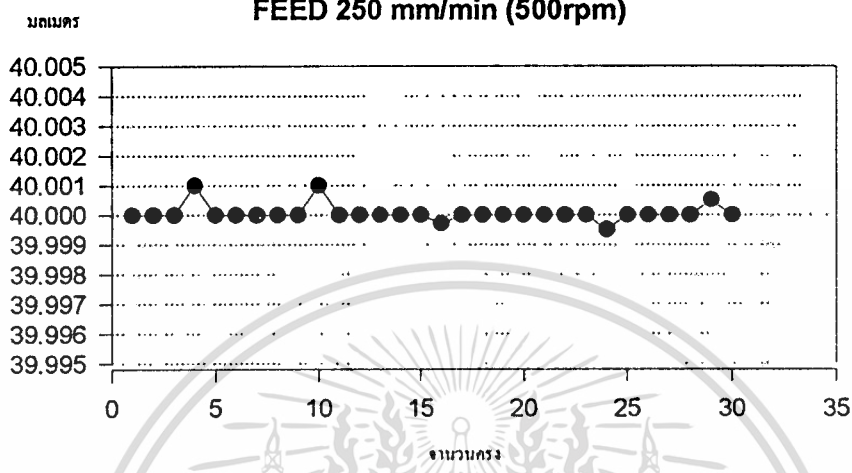
#### การทดลองโดยใช้เซอร์โวมอเตอร์

ในการทดลองจะทำการเก็บข้อมูลในแต่ละความเร็วของการเคลื่อนที่ โดยทำการทดลอง 30 ครั้ง เพื่อเก็บข้อมูลและนำมาใส่ค่าลงบนกราฟ ซึ่งจะแสดงผลการทดลองของการใช้เซอร์โวมอเตอร์ที่ความเร็วต่าง ๆ ตามลำดับ การวัดค่าการเคลื่อนที่จะวัดทั้งระยะการป้อนชุดหินเข้าเจียร์งาน และระยะการถอยกลับเข้าที่ตำแหน่งเริ่มต้น

ภาพที่ 56

### SERVO MOTER

FEED 250 mm/min (500rpm)

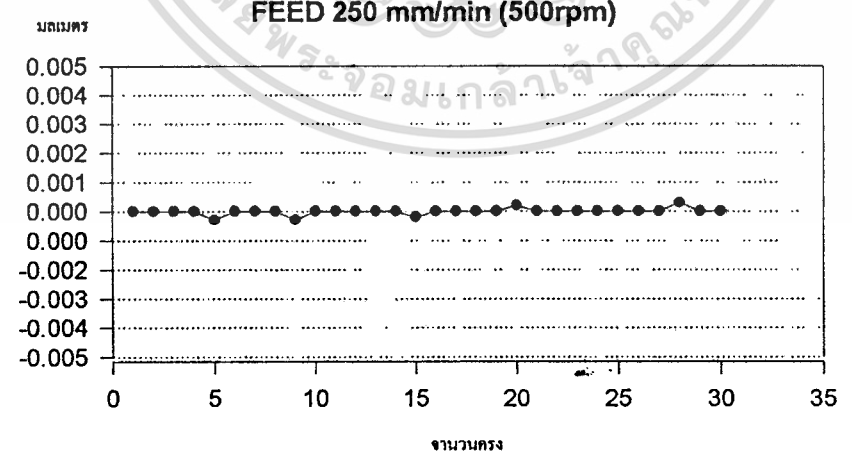


แสดงระยะที่เคลื่อนที่ของชุดหิน เมื่อใช้เซอร์โวมอเตอร์ขับเคลื่อน  
 เข้าเจียงานที่ความเร็วต่ำ 500 รอบต่อนาที

ภาพที่ 57

### SERVO MOTER

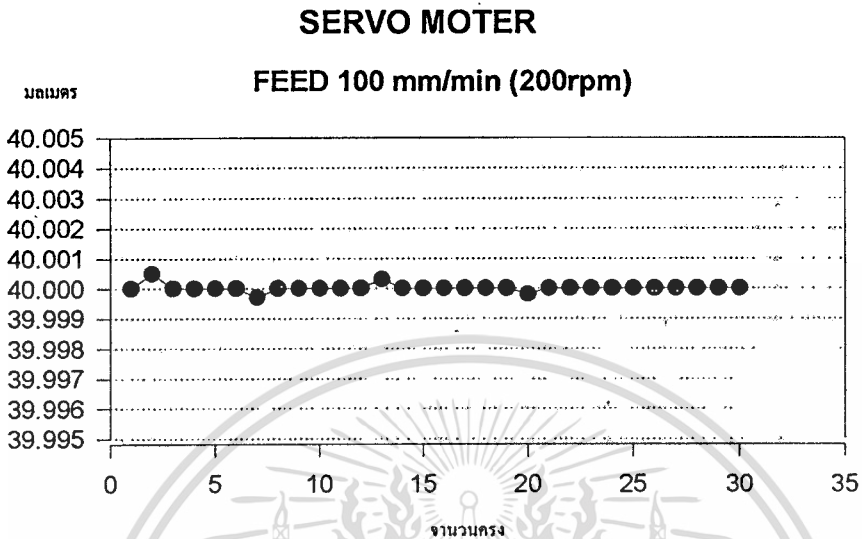
FEED 250 mm/min (500rpm)



แสดงระยะที่เคลื่อนที่ที่กลับตำแหน่งเริ่มต้นของชุดหินเมื่อใช้เซอร์โวมอเตอร์ขับเคลื่อน

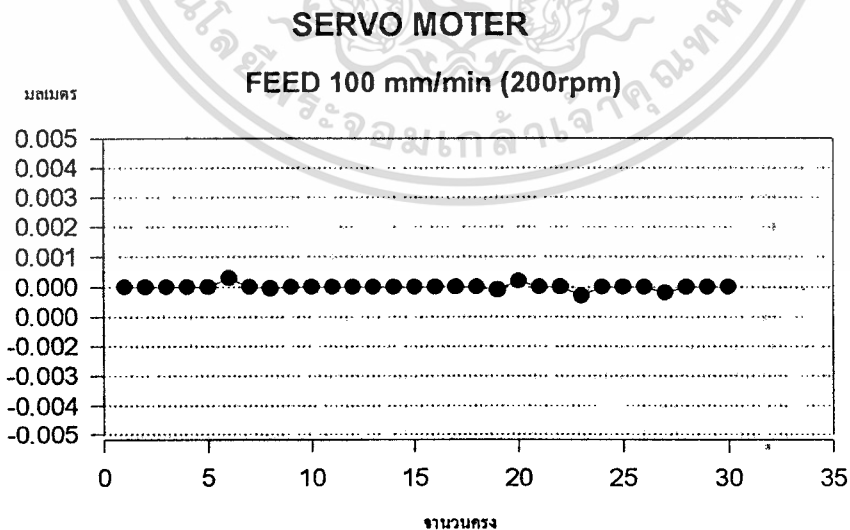
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 58



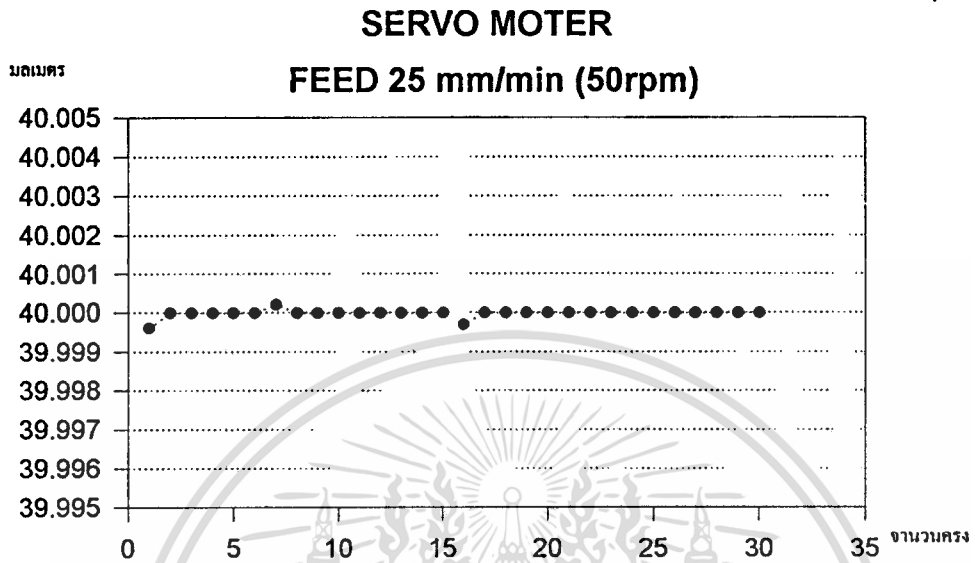
แสดงระยะที่เคลื่อนที่ของชุดหิน เมื่อใช้เซอร์โวมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ความเร็วต่ำ 200 รอบต่อนาที

ภาพที่ 59



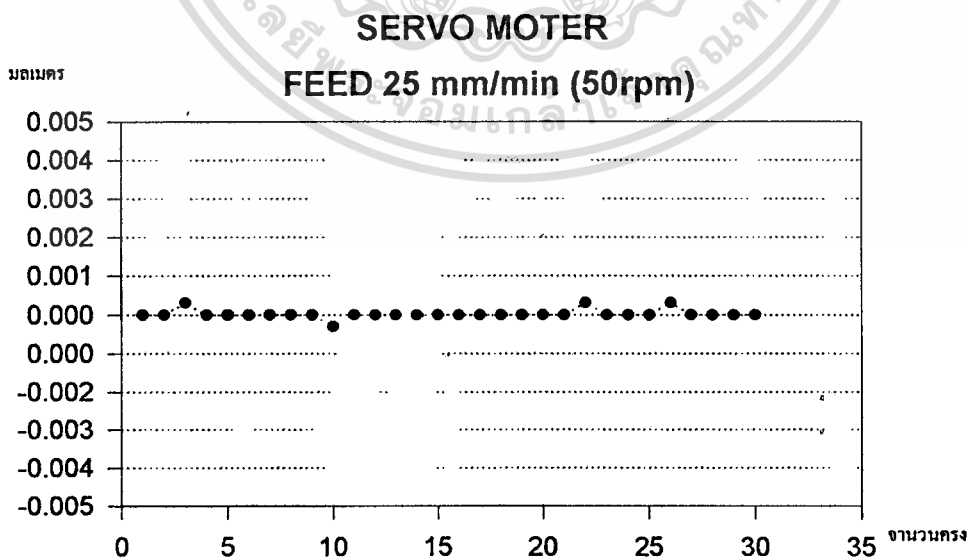
แสดงระยะที่เคลื่อนที่กลับตำแหน่งเริ่มต้นของชุดหินเมื่อใช้เซอร์โวมอเตอร์ขับเคลื่อน

ภาพที่ 60



แสดงระยะที่เคลื่อนที่ของจุดหิน เมื่อใช้เซอร์โวมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ความเร็วค่า 50 รอบต่อนาที

ภาพที่ 61

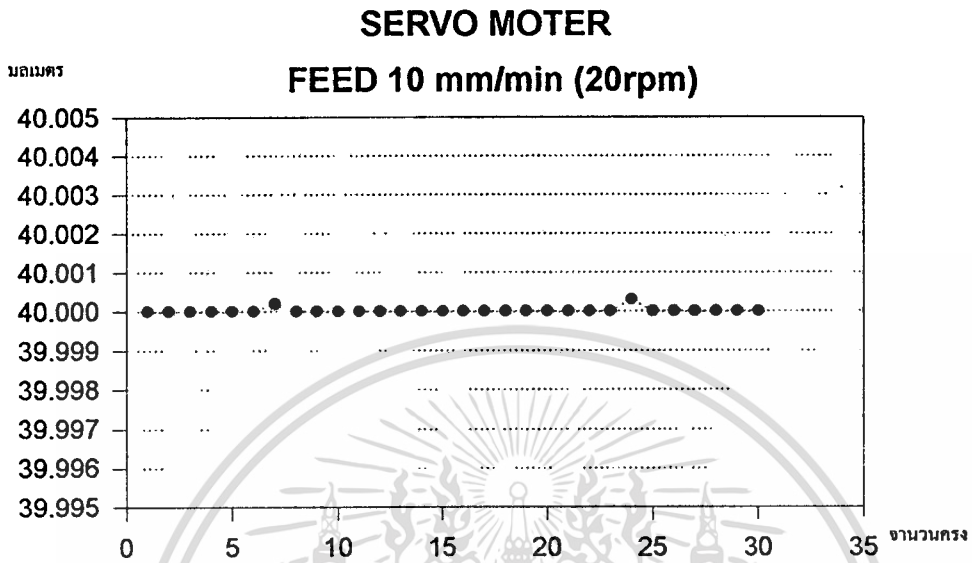


แสดงระยะที่เคลื่อนที่กลับตำแหน่งเริ่มต้นของจุดหินเมื่อใช้เซอร์โวมอเตอร์ขับเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

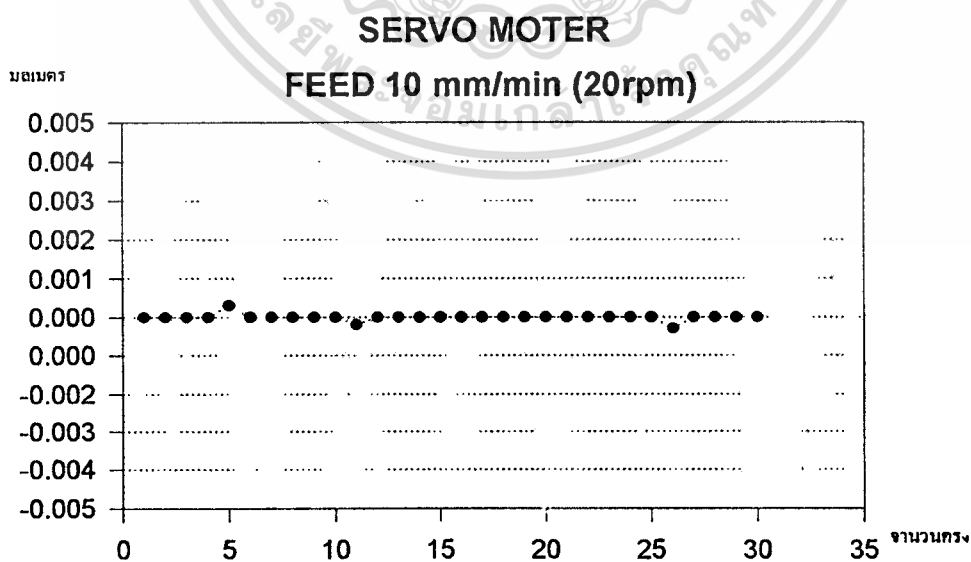
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 62



แสดงระยะที่เคลื่อนที่ของชุดหิน เมื่อใช้เซอร์โวมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ความเร็วต่ำ 20 รอบต่อนาที

ภาพที่ 63



แสดงระยะที่เคลื่อนที่กลับตำแหน่งเริ่มต้นของชุดหินเมื่อใช้เซอร์โวมอเตอร์ขับเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

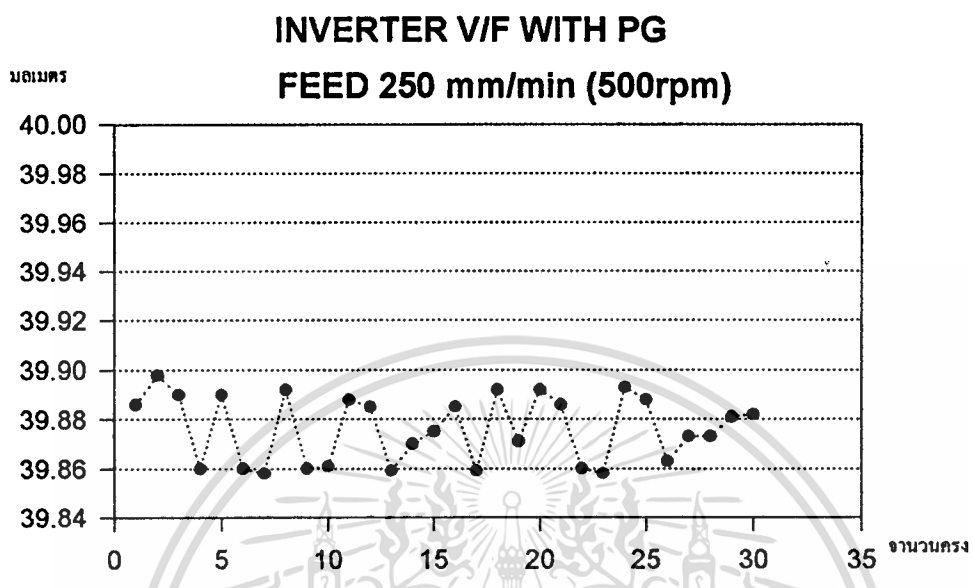
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การทดลองโดยใช้อินดักชันมอเตอร์

ในการทดลอง ในส่วนของการใช้อินดักชันมอเตอร์ที่ใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็ว เรา จะทดลองในลักษณะเดียวกับเซอร์โวมอเตอร์ ซึ่งจะทดลอง 30 ครั้งเพื่อเก็บข้อมูล แต่ในการ ทดลองของอินดักชันมอเตอร์ที่ควบคุมความเร็วด้วยอินเวอร์เตอร์จะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 วิธี คือจะทดลองการควบคุมตำแหน่งด้วยอินดักชันมอเตอร์ที่ใช้อินเวอร์เตอร์แบบควบคุมอัตราส่วน V/f ที่มีการป้อนกลับความเร็วด้วย PG และทดลองการควบคุมตำแหน่งด้วยอินดักชันมอเตอร์ที่ใช้ อินเวอร์เตอร์แบบควบคุมเว็กเตอร์ ซึ่งจะนำข้อมูลมาใส่ลงในกราฟ

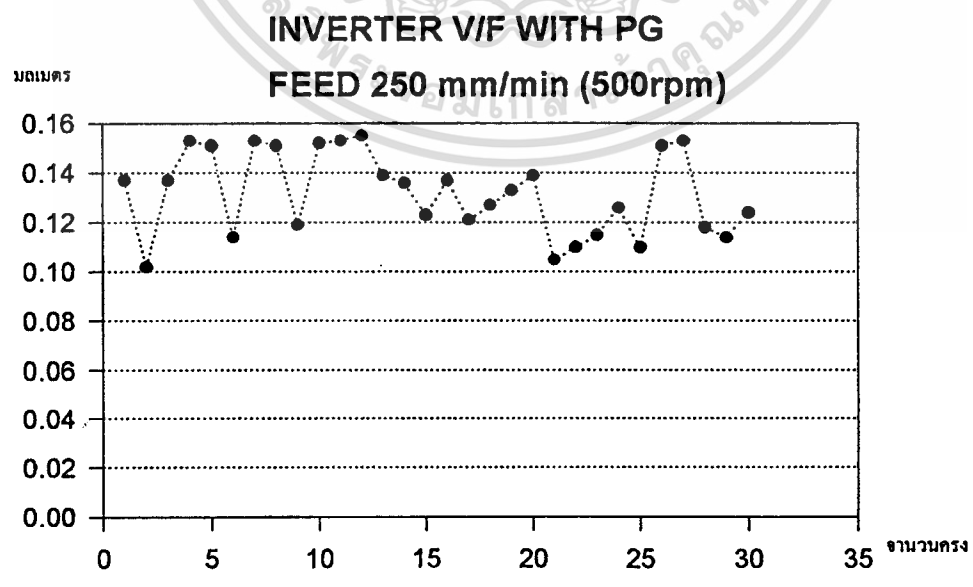


ภาพที่ 64



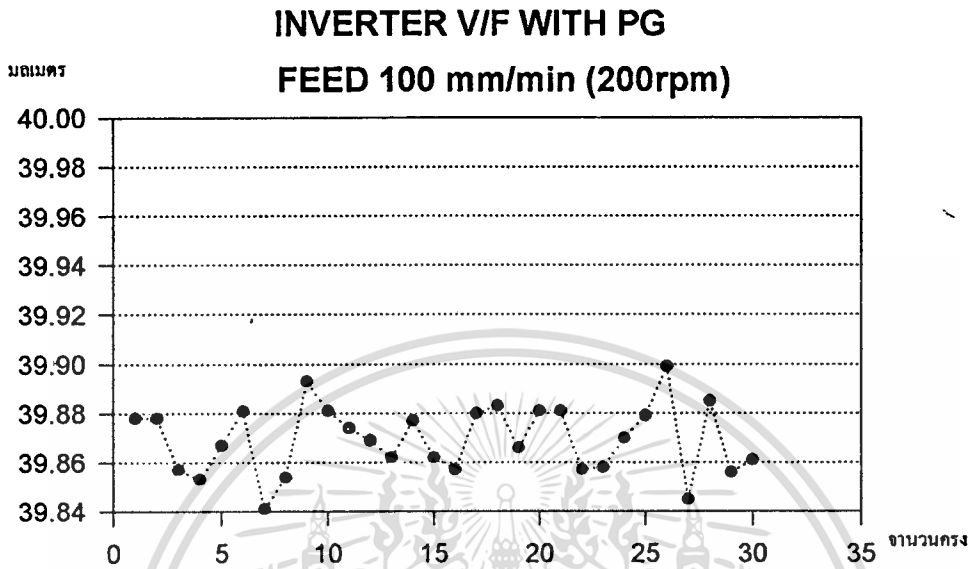
แสดงระยะที่เคลื่อนที่ของชุดหิน เมื่อใช้อินคักชั่นมอเตอร์ขับเคลื่อนเข้าเจียงาน  
ที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที

ภาพที่ 65



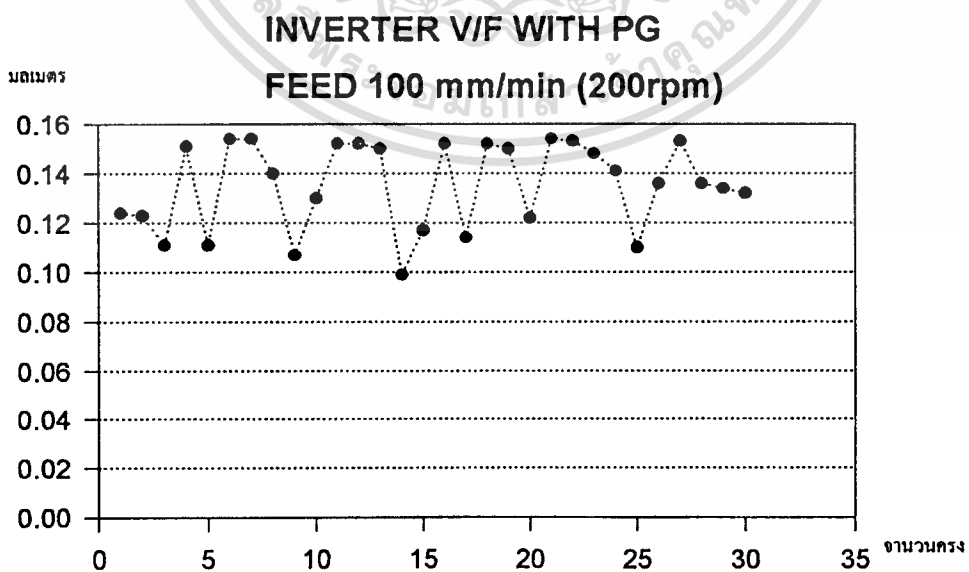
แสดงระยะที่เคลื่อนที่กลับตำแหน่งเริ่มต้นของชุดหินเมื่อใช้อินคักชั่นมอเตอร์ขับเคลื่อน

ภาพที่ 66



แสดงระยะที่เคลื่อนที่ของชุดหิน เมื่อใช้อินตักซ์นมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที

ภาพที่ 67

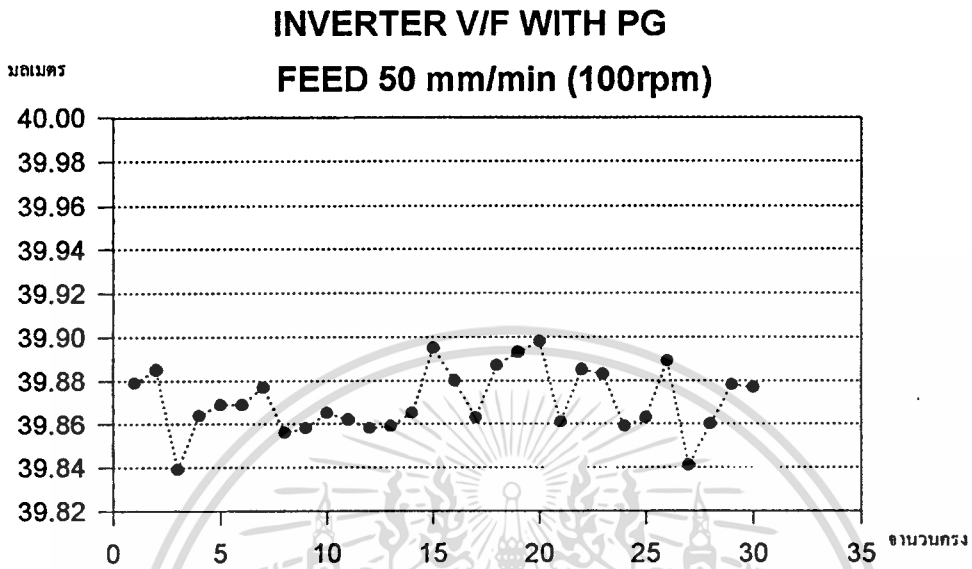


แสดงระยะที่เคลื่อนที่กลับตำแหน่งเริ่มต้นของชุดหินเมื่อใช้อินตักซ์นมอเตอร์ขับเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเป็นเจ้าของเพื่อการค้าเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นใบเสร็จรับเงินด้านการค้า

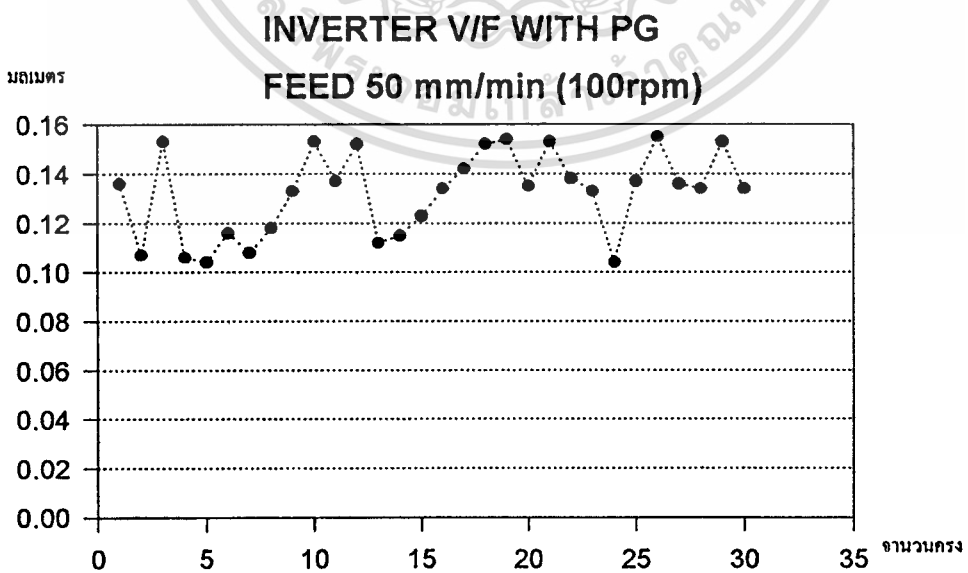
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 68



แสดงระยะที่เคลื่อนที่ของชุดหิน เมื่อใช้อินคักชั่นมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที

ภาพที่ 69

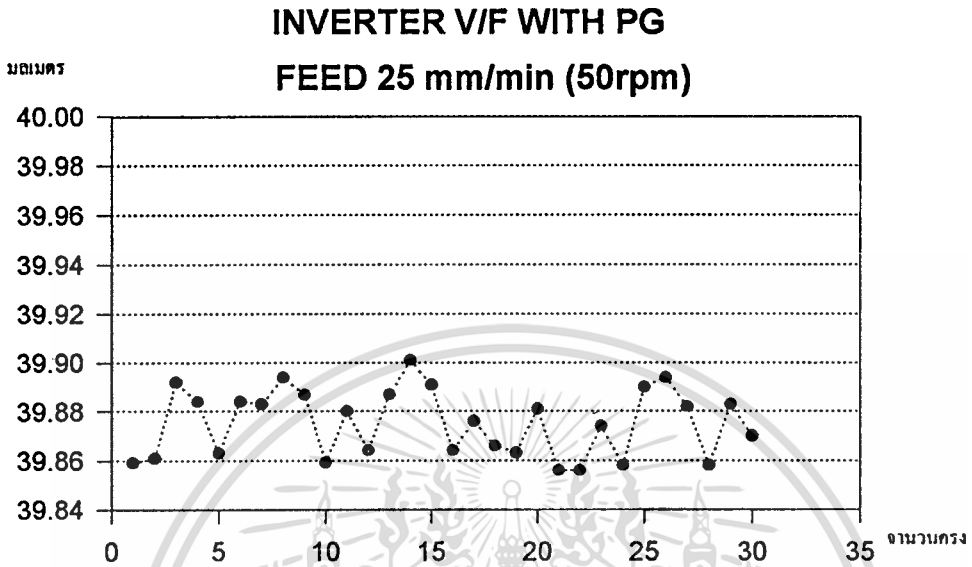


แสดงระยะที่เคลื่อนที่กลับตำแหน่งเริ่มต้นของชุดหินเมื่อใช้อินคักชั่นมอเตอร์ขับเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นแจ้งใช้ประโยชน์ด้านการค้า

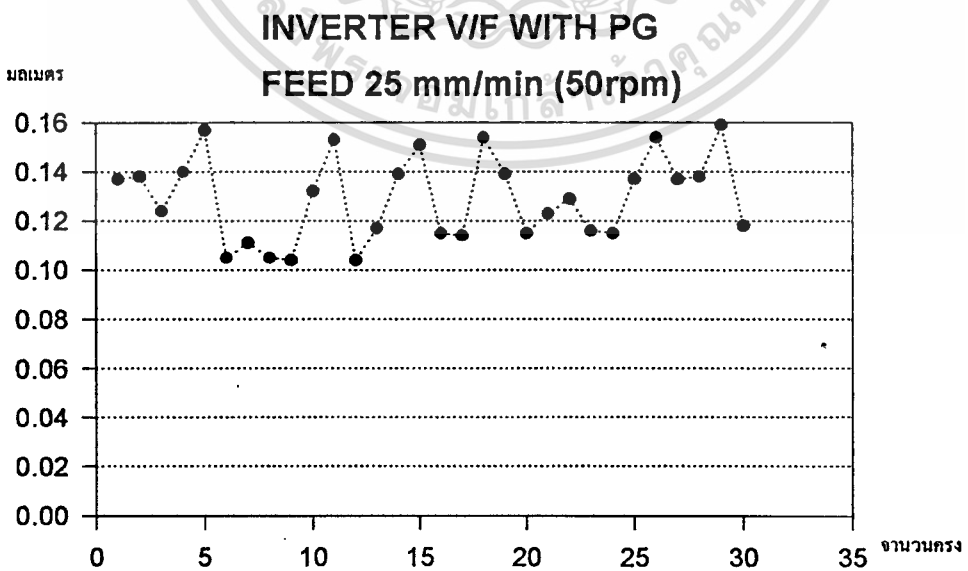
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 70



แสดงระยะที่เคลื่อนที่ของชุดหิน เมื่อใช้อินคักชั่นมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ความเร็ว 50 รอบต่อนาที

ภาพที่ 71

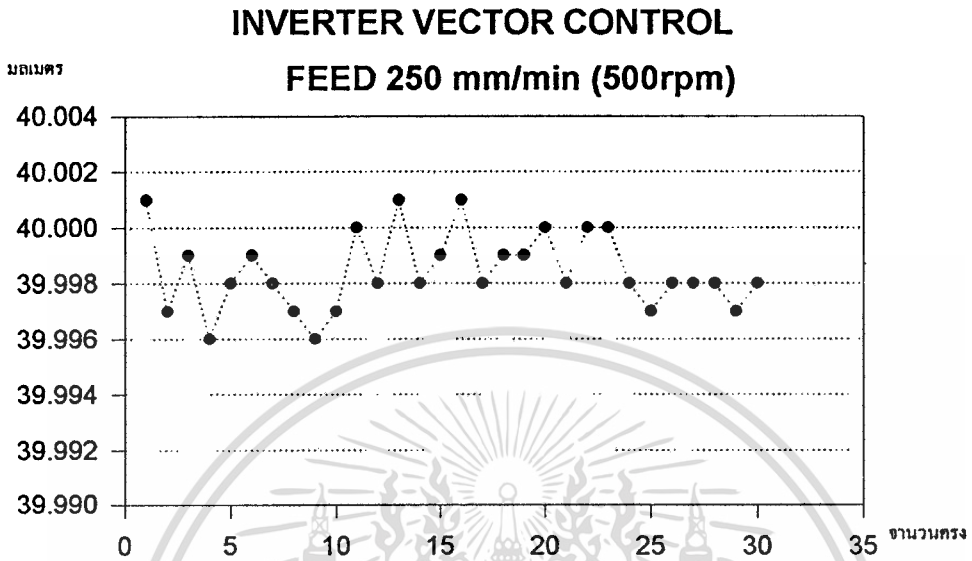


แสดงระยะที่เคลื่อนที่กลับตำแหน่งเริ่มต้นของชุดหินเมื่อใช้อินคักชั่นมอเตอร์ขับเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ด้านการค้า

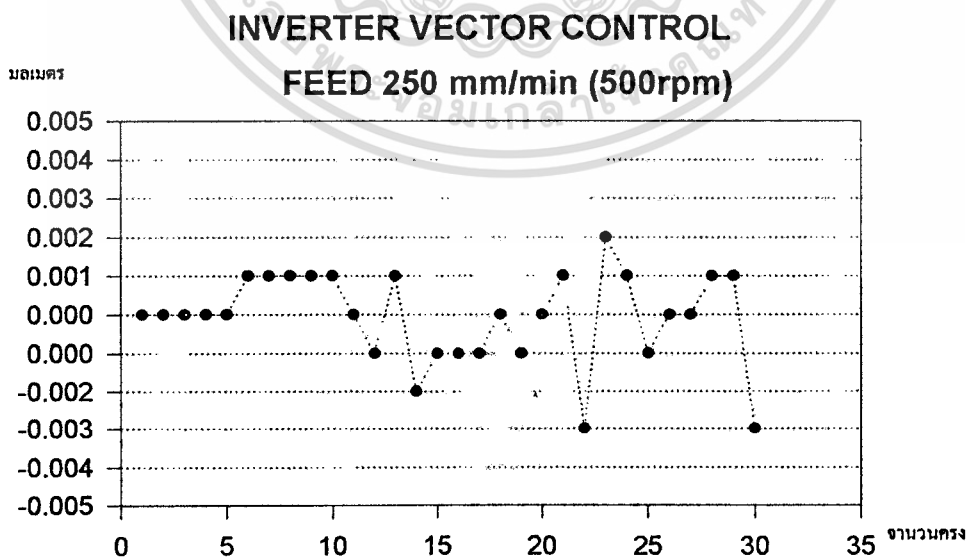
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 72



แสดงระยะที่เคลื่อนที่ของชุดหิน เมื่อใช้อินคักชั่นมอเตอร์ขับเคลื่อนเข้าใช้งาน  
ที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที

ภาพที่ 73

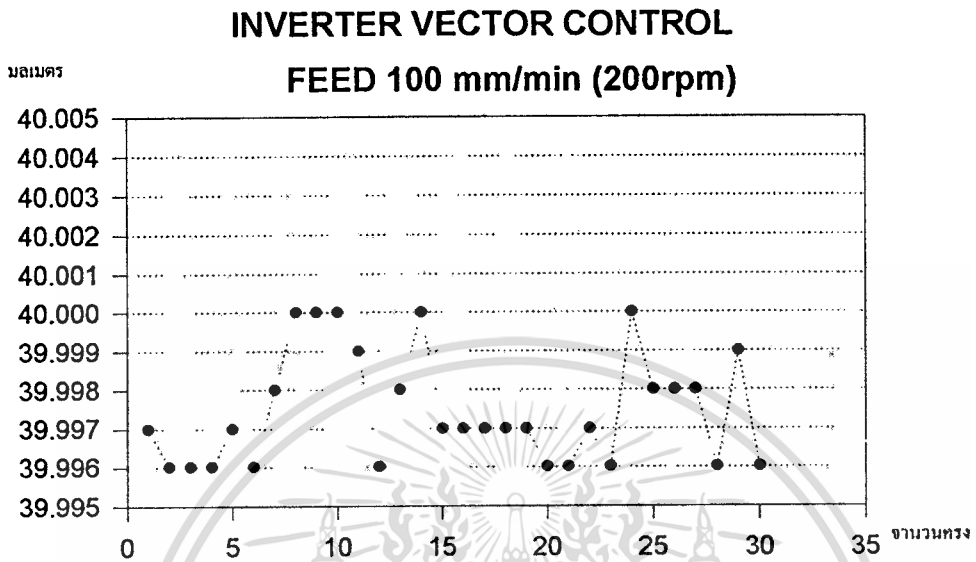


แสดงระยะที่เคลื่อนที่กลับตำแหน่งเริ่มต้นของชุดหินเมื่อใช้อินคักชั่นมอเตอร์ขับเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

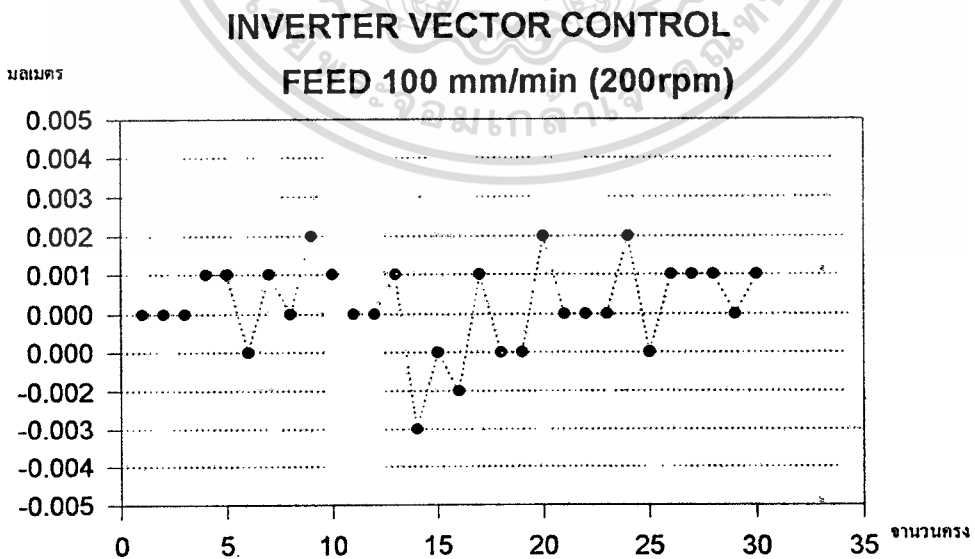
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 74



แสดงระยะที่เคลื่อนที่ของชุดหิน เมื่อใช้อินคัทชันมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที

ภาพที่ 75

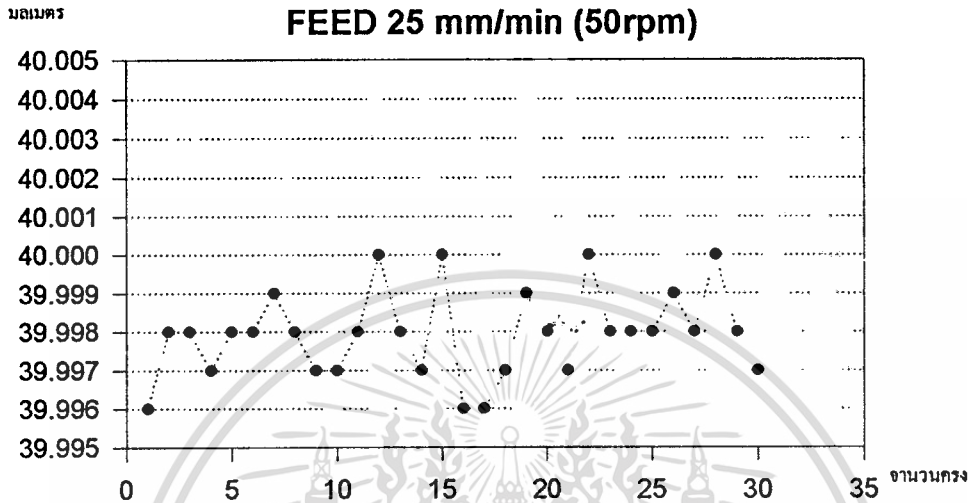


แสดงระยะที่เคลื่อนที่กลับตำแหน่งเริ่มต้นของชุดหินเมื่อใช้อินคัทชันมอเตอร์ขับเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 76

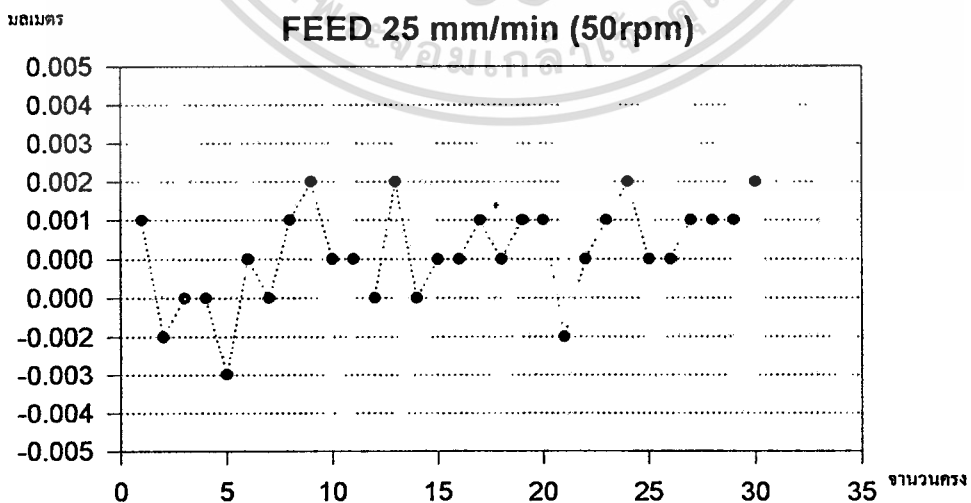
### INVERTER VECTOR CONTROL FEED 25 mm/min (50rpm)



แสดงระยะที่เคลื่อนที่ของชุดหิน เมื่อใช้อินเตอร์คัทมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ความเร็ว 50 รอบต่อนาที

ภาพที่ 77

### INVERTER VECTOR CONTROL FEED 25 mm/min (50rpm)

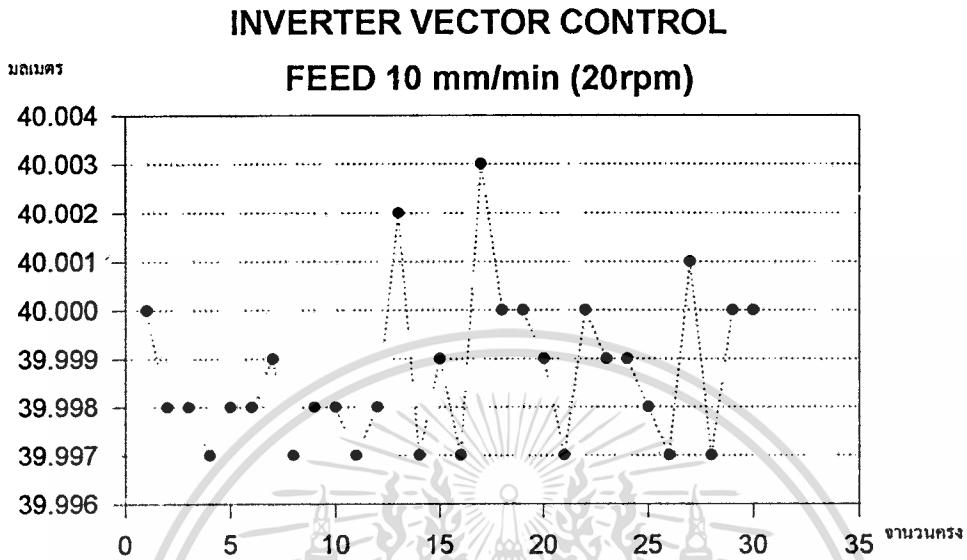


แสดงระยะที่เคลื่อนที่กลับตำแหน่งเริ่มต้นของชุดหินเมื่อใช้อินเตอร์คัทมอเตอร์ขับเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

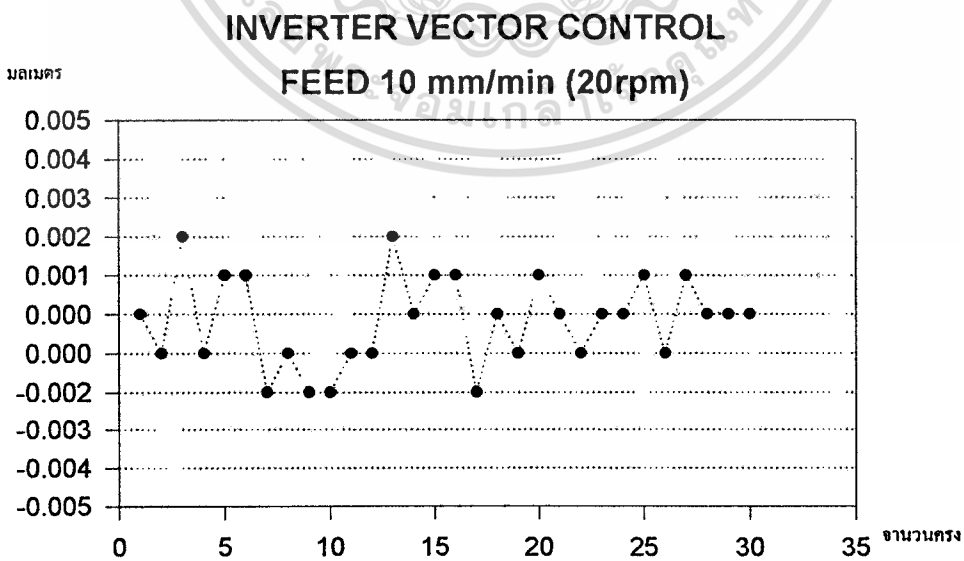
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 78



แสดงระยะที่เคลื่อนที่ของชุดหิน เมื่อใช้อินดักชั่นมอเตอร์ขับเคลื่อนเข้าใช้งาน  
ที่ความเร็ว 20 รอบต่อนาที

ภาพที่ 79



แสดงระยะที่เคลื่อนที่กลับตำแหน่งเริ่มต้นของชุดหินเมื่อใช้อินดักชั่นมอเตอร์ขับเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

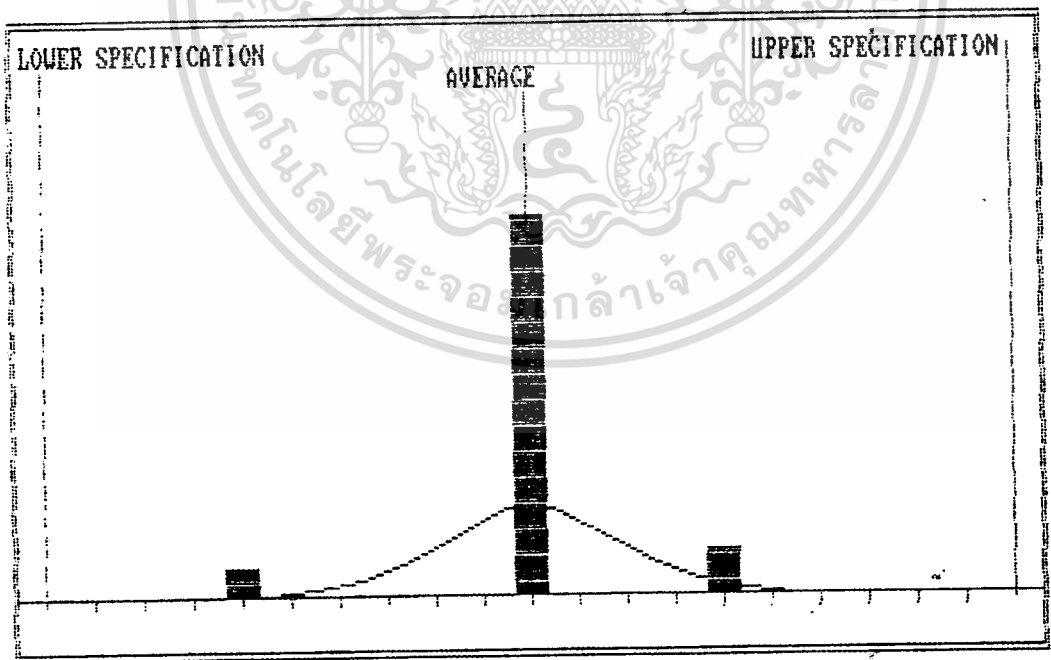
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 7

### สรุปผลการทดลอง

ผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดระยะทางการเคลื่อนที่ของชุดหินที่เคลื่อนที่เข้าเจียร์ชิ้นงานและเคลื่อนที่กลับเข้าตำแหน่งเริ่มต้นตามลำดับของซีเอ็นซีโปรแกรม พบว่าเมื่อใช้เซอร์โวมอเตอร์เป็นอุปกรณ์ขับเคลื่อนสกรู จากบทที่ 6 เมื่อนำข้อมูลที่ได้อมาวิเคราะห์หาค่าความน่าเชื่อถือของระบบโดยใช้วิธีการทางสถิติ (Capability Analysis)  $6\sigma$  โดยนำข้อมูลจากการทดลองทั้งสามวิธีที่ feed 100 mm/min โดยที่ข้อมูลของเซอร์โวมอเตอร์จะตั้งค่า Upper Control Limit ที่ 40.001 มิลลิเมตร และค่า Lower Control Limit ที่ 39.999 มิลลิเมตร จะได้ผลลัพธ์ดังภาพที่ 80

ภาพที่ 80

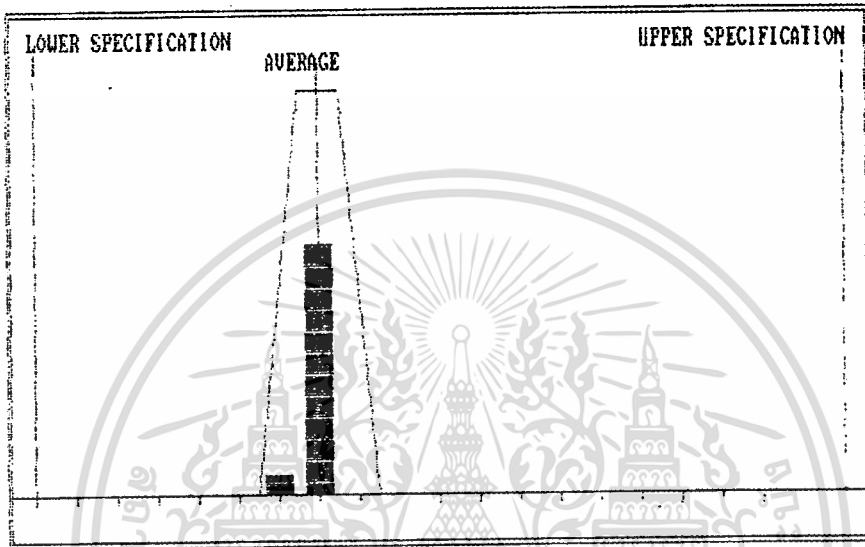


แสดงการกระจายข้อมูลของเซอร์โวมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทำงานเดียวกันนำข้อมูลของอินดักซ์นมอเตอร์ที่ feed 100 mm/min เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบ V/F โดยตั้ง โดยที่ข้อมูลของเซอร์โวมอเตอร์จะตั้งค่า Upper Control Limit ที่ 40.5 มิลลิเมตร และค่า Lower Control Limit ที่ 39.5 มิลลิเมตร จะได้ผลลัพธ์ดังภาพที่ 81

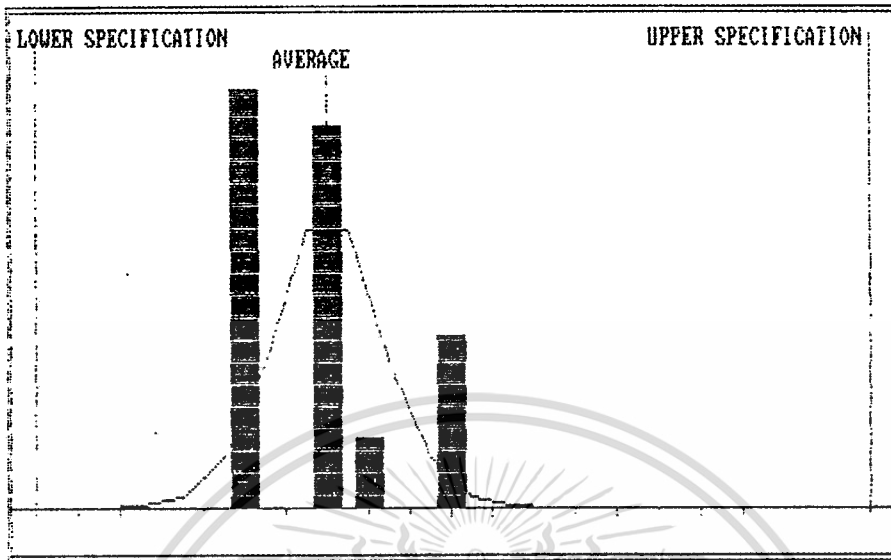
ภาพที่ 81



แสดงการกระจายข้อมูลของอินเวอร์เตอร์แบบ V/F

และในการทำงานเดียวกันนำข้อมูลของอินดักซ์นมอเตอร์ที่ feed 100 mm/min เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบเว็คเตอร์คอนโทรล โดยตั้ง โดยที่ข้อมูลของเซอร์โวมอเตอร์จะตั้งค่า Upper Control Limit ที่ 40.010 มิลลิเมตร และค่า Lower Control Limit ที่ 39.90 มิลลิเมตร จะได้ผลลัพธ์ดังภาพที่ 82

ภาพที่ 82



แสดงการกระจายข้อมูลของอินเวอร์เตอร์แบบเว็คเตอร์คอนโทล

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติจะพบว่าเมื่อใช้เซอร์โวมอเตอร์จะสามารถควบคุมระยะความผิดพลาดของการเข้าสู่จุดเป้าหมายอยู่ในระยะไม่เกิน  $\pm 1$  ไมโครเมตร ซึ่งเป็นค่าความละเอียดที่จะใช้สำหรับการควบคุมงานเจียรนัยได้ แต่เมื่อนำเอาอินดักชันมอเตอร์มาใช้แทนเซอร์โวมอเตอร์โดยใช้อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ควบคุมความเร็วซึ่งจะให้ผลลัพธ์ที่ต่างกัน คือถ้าเลือกวิธีการควบคุมความเร็วแบบ  $V/f$  พบว่าระบบควบคุมจะทำงานโดยการขับเคลื่อนชุดหินให้เข้าเจียรชิ้นงานและถอยกลับเข้าตำแหน่งเริ่มต้น ได้แต่จะให้ความผิดพลาดในการควบคุมจากเป้าหมายอยู่ในย่าน  $\pm 0.5$  มิลลิเมตร ซึ่งเกิดจากการควบคุมของ  $V/f$  ที่ไม่สามารถทำงานที่ย่านความถี่ที่ต่ำกว่า 1.3 Hz จึงเป็นเหตุให้มอเตอร์หยุดทำงานก่อนถึงเป้าหมาย ส่วนในการควบคุมความเร็วของอินดักชันมอเตอร์ด้วยวิธีการควบคุมเว็คเตอร์จะทำให้ผลลัพธ์ของการเข้าสู่เป้าหมายของระบบดีขึ้น โดยที่มอเตอร์สามารถขับให้ชุดหินเคลื่อนเข้าเจียรชิ้นงานและเคลื่อนเข้าสู่เป้าหมายเริ่มต้นได้ โดยให้ค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมายไม่เกิน  $\pm 10$  ไมโครเมตร ซึ่งถ้านำไปใช้กับระบบควบคุมงานเจียรนัยละเอียด จะไม่สามารถใช้งานได้ แต่จะสามารถใช้งานได้กับการเจียรนัยที่ไม่ต้องการความละเอียดได้

จากผลการทดสอบการควบคุมตำแหน่งอัตโนมัติที่ใช้อินดักชันมอเตอร์เป็นอุปกรณ์ขับอยู่ในย่าน  $\pm 10$  ไมโครเมตร ซึ่งผลลัพธ์นี้ชี้ให้เห็นว่าเราสามารถที่จะนำไปใช้งานได้กับงานที่ต้องการควบคุมตำแหน่งที่ไม่ต้องการค่าที่ละเอียดมากนัก เช่น งานสายพานลำเลียงที่ต้องการความแม่นยำ ใช้เป็นหุ่นยนต์สำหรับขนถ่ายชิ้นงานในเครื่องล้างอัตโนมัติหรือในเครื่องผสมอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1]. D.O'Kelly and S.Simmons, "Introduction to Generalized Electrical Machine Theory," McGraw-Hill. Publishing Company Limited., 1968.
- [2]. S.R.Ruocco, "Robot sensors and transducers" Halsted Press John Wiley & Sons., 1987.
- [3]. Shinko Electric, "Servo Systems made Simple" 1987.
- [4]. โยชิน เปร้มปราณีรัชต์ "วิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์" 2526.
- [5]. Electro Craft Engineering Handbook, "DC Motors Speed Controls Servo Systems," Reliance Motion Control & Inc.,
- [6]. T.J.E.Miller, "Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives," Clarendon Press Oxford. 1989
- [7]. D.Yasuhiko "Servo Motor and Motion Control Using Digital Signal Processors," Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 7632. 1990.
- [8]. Parker. "Step Motor & Servo Motor Systems and Controls". 1996.
- [9]. W.S.Seames, "Computer numerical Control concepts and programming," 2<sup>nd</sup> ed., 1990.
- [10]. H.Berger, "Automatic with the SIMATIC S5-115 U [Hans Berger]," Siemens-Berlin; Munchen : Siemens-Aktienges; [Abt. Verl], 1989
- [11]. Siemens "Position module IP246 with function block FB 164" 1987
- [12]. M.H.Rashid, "Power Electronics Circuit, Devices, and Applications" Prentice-Hall International, Inc., Second edition. 1993.
- [13]. NED, M. Tore UNDELAND, W.P. Robbins "Power Electronics Converters, Applications, and Design", John Wiley & Sons, Inc., Second edition. 1995.
- [14]. กอบชัย เดชหาญ จีรศักดิ์ ชาญวุฒิชรรณ เชื้อ นกอยู่, "การควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของสายพานลำเลียงด้วยพีแอลซี", ประชุมวิชาการครั้งที่ 35 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กุมภาพันธ์ 2540



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

### ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

1. กอบชัย เดชหาญ เชื้อ นกอยู่ สมยศ จุณณะปิยะ, “การอบแห้งแบบเปิดสำหรับงานเอนกประสงค์,” วส.ท ครั้งที่ 5 มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 16-17 สิงหาคม 2533.
2. กอบชัย เดชหาญ จีรศักดิ์ ชาญวุฒิธรรม เชื้อ นกอยู่, “การควบคุมตำแหน่ง การเคลื่อนที่ของสายพานลำเลียงด้วย พีแอลซี”, การประชุมวิชาการ ครั้งที่ 35 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กุมภภาพันธุ์ 2540



## ภาคผนวก. ข.

### ข้อมูล

- แสดงข้อมูลเครื่องจักรสำหรับ โปซิชั่นโมดูล ในการทดลอง
- แสดงภาพ โครงสร้างของคีมอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่านของซีเมนต์



ตารางที่ 1

**Machine Data for Sovo motor**

Machine Data	Source FD Block NO 010	Axis 1	Module 01	Meas. System mm
Maximum deceleration	2000	(mm/sec~)		(10...9999)
Acceleration fwd.	200	(mm/sec~)		(10...9999)
Dcceleration fwd.	400	(mm/sec~)		(10...9999)
Acceleration rev.	100	(mm/sec~)		(10...9999)
Dcceleration rev.	400	(mm/sec~)		(10...9999)
Pulse evaluation	1	(1,2,4)		
Resolution	0.02	(mm/1000Pls)		(0.1...99.9)
Gain factor	15	(1/sec)		(0.1...99.9)
Backlash comp. valve	17	(mm)		(0.000...64.999)
Standstill monitor	1.000	(mm)		(0.000...64.999)
Max. following error	10.000	(mm)		(0.000...64.999)
Ref. Point coordinate	0.000	(mm)		(+40000.000)
Software lower limit	-25.000	(mm)		(+40000.000)
Software upper limit	90.000	(mm)		(+40000.000)
Tool length offset	0.000	(mm)		(+40000.000)
Zero offset 1	0.000	(mm)		(+40000.000)
Zero offset 2	0.000	(mm)		(+40000.000)
Zero offset 3	0.000	(mm)		(+40000.000)
Zero offset 4	0.000	(mm)		(+40000.000)
Maximum speed	1000	(mm/mim)		(1..65000)
Jog speed 1 fwd.	80	(mm/mim)		(1..65000)
Jog speed 1 rev.	80	(mm/mim)		(1..65000)
Jog speed 2 fwd.	50	(mm/mim)		(1..65000)
Jog speed 2 rev.	50	(mm/mim)		(1..65000)
Incremental speed	100	(mm/mim)		(1..65000)
Reference speed 1	80	(mm/mim)		(1..65000)
Reference speed 2	50	(mm/mim)		(1..65000)
Reference direction	rev.	(fwd/rev)		

**แสดงข้อมูลเครื่องจักรสำหรับโพชิชั่น โมดูล (ไอพี 246) เมื่อใช้เซอร์โวมอเตอร์ขับเคลื่อน**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 2

### Machine Data for Induction motor with V/F Inverter

Machine Data	Source FD Block NO 010	Axis 1	Module 01	Meas. System mm
Maximum deceleration	200	(mm/sec~)		(10...9999)
Acceleration fwd.	100	(mm/sec~)		(10...9999)
Dcceleration fwd.	200	(mm/sec~)		(10...9999)
Acceleration rev.	100	(mm/sec~)		(10...9999)
Dcceleration rev.	200	(mm/sec~)		(10...9999)
Pulse evaluation	1	(1,2,4)		
Resolution	0.2	(mm/1000Pls)		(0.1...99.9)
Gain factor	1.5	(1/sec)		(0.1...99.9)
Backlash comp. valve	17.00	(mm)		(0.000...64.999)
Standstill monitor	1.000	(mm)		(0.000...64.999)
Max. following error	10.000	(mm)		(0.000...64.999)
Ref. Point coordinate	0.000	(mm)		(+40000.000)
Software lower limit	-25.000	(mm)		(+40000.000)
Software upper limit	90.000	(mm)		(+40000.000)
Tool length offset	0.000	(mm)		(+40000.000)
Zero offset 1	0.000	(mm)		(+40000.000)
Zero offset 2	0.000	(mm)		(+40000.000)
Zero offset 3	0.000	(mm)		(+40000.000)
Zero offset 4	0.000	(mm)		(+40000.000)
Maximum speed	500	(mm/mim)		(1..65000)
Jog speed 1 fwd.	80	(mm/mim)		(1..65000)
Jog speed 1 rev.	80	(mm/mim)		(1..65000)
Jog speed 2 fwd.	50	(mm/mim)		(1..65000)
Jog speed 2 rev.	50	(mm/mim)		(1..65000)
Incremental speed	345	(mm/mim)		(1..65000)
Reference speed 1	150	(mm/mim)		(1..65000)
Reference speed 2	50	(mm/mim)		(1..65000)
Reference direction	fwd.	(fwd/rev)		

แสดงข้อมูลเครื่องจักรสำหรับโพจิชันโมดูล (ไอพี 246) เมื่อใช้อินเตอร์คัมเมอร์ที่ควบคุม

ความเร็วด้วยอินเวอร์เตอร์แบบ v/f ขับลิกสกรู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้งานนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3

**Machine Data for Induction motor with Vector Control**

Machine Data	Source FD Block NO 010	Axis 1	Module 01	Meas. System mm
Maximum deceleration	200	(mm/sec~)		(10...9999)
Acceleration fwd.	100	(mm/sec~)		(10...9999)
Dcceleration fwd.	200	(mm/sec~)		(10...9999)
Acceleration rev.	100	(mm/sec~)		(10...9999)
Dcceleration rev.	200	(mm/sec~)		(10...9999)
Pulse evaluation	1	(1,2,4)		
Resolution	0.2	(mm/1000Pls)		(0.1...99.9)
Gain factor	1.5	(1/sec)		(0.1...99.9)
Backlash comp. valve	17.00	(mm)		(0.000...64.999)
Standstill monitor	1.000	(mm)		(0.000...64.999)
Max. following error	10.000	(mm)		(0.000...64.999)
Ref. Point coordinate	0.000	(mm)		(+40000.000)
Software lower limit	-25.000	(mm)		(+40000.000)
Software upper limit	90.000	(mm)		(+40000.000)
Tool length offset	0.000	(mm)		(+40000.000)
Zero offset 1	0.000	(mm)		(+40000.000)
Zero offset 2	0.000	(mm)		(+40000.000)
Zero offset 3	0.000	(mm)		(+40000.000)
Zero offset 4	0.000	(mm)		(+40000.000)
Maximum speed	500	(mm/mim)		(1..65000)
Jog speed 1 fwd.	80	(mm/mim)		(1..65000)
Jog speed 1 rev.	80	(mm/mim)		(1..65000)
Jog speed 2 fwd.	50	(mm/mim)		(1..65000)
Jog speed 2 rev.	50	(mm/mim)		(1..65000)
Incremental speed	345	(mm/mim)		(1..65000)
Reference speed 1	150	(mm/mim)		(1..65000)
Reference speed 2	50	(mm/mim)		(1..65000)
Reference direction	fwd.	(fwd/rev)		

แสดงข้อมูลเครื่องจักรสำหรับโพซิชัน โมดูล (ไอพี 246) เมื่อใช้อินคักชั่นมอเตอร์ที่ควบคุม

ความเร็วด้วยอินเวอร์เตอร์แบบควบคุมเวกเตอร์ขับเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ภายในเท่านั้น เมื่อเผยแพร่ให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 4

คำสั่ง G	ความหมาย
G00	การเคลื่อนที่เข้าสู่ตำแหน่งด้วยความเร็วสูงสุด
G01	การเคลื่อนที่ด้วยอัตราป้อนที่กำหนดให้ ในแนวเส้นตรง
G02	การเคลื่อนที่ป้อนมิดในแนวเส้นโค้งตามเข็มนาฬิกา
G03	การเคลื่อนที่ป้อนมิดในแนวเส้นโค้งทวนเข็มนาฬิกา
G04	การหยุดนิ่งชั่วขณะ
G17	การเลือกกระนาบ XY มี Z เป็นแกนเครื่องมือตัด
G18	การเลือกกระนาบ ZX มี Y เป็นแกนเครื่องมือตัด
G19	การเลือกกระนาบ YZ มี X เป็นแกนเครื่องมือตัด
G40	การลบคำสั่งการเพื่อระยะรัศมีของมิดก้น
G41	การเพื่อระยะรัศมีของมิดก้น-มิดก้นอยู่ทางด้านซ้ายของชิ้นงาน
G42	การเพื่อระยะรัศมีของมิดก้น-มิดก้นอยู่ทางด้านขวาของชิ้นงาน
G53	การลบคำสั่งกำหนดจุดศูนย์กลางของชิ้นงานหรือเลือกใช้จุดศูนย์กลางของเครื่อง
G54-59	การกำหนดจุดศูนย์กลางของชิ้นงาน
G63	อัตราป้อน 100%
G64	การลบคำสั่งอัตราป้อน 100%
G71-79	การกัด (Pocket) แบบต่าง ๆ
G80	การลบคำสั่งในการเจาะรู
G81-89	คำสั่งในการเจาะรูลักษณะต่าง ๆ
G90	การวัดระยะแบบค่าสัมบูรณ์
G91	การวัดระยะแบบลูกโซ่
G94	อัตราป้อนเป็น มม/นาที
G95	อัตราป้อนเป็น มม/รอบ

แสดงความหมายของ จี-โค้ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 5

คำสั่ง M	ความหมาย
M00	การหยุดโปรแกรม
M01	การหยุดโปรแกรมแบบมีเงื่อนไข
M02	การสิ้นสุดโปรแกรม
M03	เพลาทัวเครื่องหมุนขวา หรือตามเข็มนาฬิกา
M04	เพลาทัวเครื่องหมุนซ้าย หรือทวนเข็มนาฬิกา
M05	หยุดเพลาทัวเครื่อง
M06	เปลี่ยนมีดกัด
M07-08	เปิดน้ำหล่อเย็น
M09	ปิดน้ำหล่อเย็น
M13	เพลาทัวเครื่องหมุนขวาและเปิดน้ำหล่อเย็น
M14	เพลาทัวเครื่องหมุนซ้ายและเปิดน้ำหล่อเย็น
M20	จับยึดชิ้นงานตามแกน X
M21	คลายชิ้นงานตามแกน X
M22	จับยึดชิ้นงานตามแกน Y
M23	คลายชิ้นงานตามแกน Y
M24	จับยึดชิ้นงานตามแกน Z
M25	คลายชิ้นงานตามแกน Z
M26	จับยึดชิ้นงานตามแกน C
M27	คลายชิ้นงานตามแกน C
*M20-27	จับยึดและคลายชิ้นงานตามแกนต่าง ๆ
M30	หยุดโปรแกรมและเตรียมพร้อมที่จะเริ่มต้นใหม่
M40-45	เปลี่ยนชุดเฟืองทด
M50-51	เปิดน้ำหล่อเย็น
M60	เปลี่ยนชิ้นงาน
M62	อัตราป้อนกักคงที่
M68	จับยึดชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 5 (ต่อ)

M69	คล้ายชิ้นงาน
M71	มุมแบบลูกโซ่
M72	มุมแบบสัมบูรณ์
M78-79	เรียกคำสั่ง G79 และยกเลิกโปรแกรม G79
หมายเหตุ	คำสั่งนอกเหนือจากนี้วางไว้สำหรับคำสั่งพิเศษเพิ่มเติม ซึ่งอาจจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับบริษัทผู้ผลิตเครื่องจักร

แสดงความหมายของ เอ็ม-โค้ด



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายเชื้อ นกอยู่
เกิดวันที่	23 มิถุนายน 2503 ที่จังหวัดสมุทรปราการ
การศึกษา	<p>ปการศึกษ 2520 - 2522 ระดับ มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนบุญจิตวิทยา ชลบุรี</p> <p>ปการศึกษ 2522 - 2524 ระดับ ปวช. สาขาไฟฟ้ากำลัง โรงเรียน ช่างอุตสาหกรรมกรุงเทพฯ กรุงเทพฯ</p> <p>ปการศึกษ 2524 - 2528 ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตร อุตสาหกรรมและวิทยาศาสตร์ สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ</p>
ปัจจุบัน	<p>ทำงานที่บริษัท ไอคอนเทคโนโลยี จำกัด ในตำแหน่ง ผู้จัดการฝ่ายวิศวกรรม</p>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้