



ปีการศึกษา 2540

การศึกษาผลกระทบในการปรับความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

IMPACT OF VARIABLE OF INDUCTION MOTOR



โดย  
นายไพศาล จิระเรืองวงศ์  
นายนิติพันธ์ คุณประเสริฐ  
นายอนันต์ เล่นทัศน์

|                                   |
|-----------------------------------|
| -5.ค.ค.2541                       |
| วัน เดือน ปี.....                 |
| เลขทะเบียน.....038588             |
| เลขเรียกหนังสือ.....T 4.0045พ9967 |

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.พิชิต ส่ายอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง

038588

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2540

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่องการศึกษาผลกระทบในการปรับความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ผู้จัดทำ

1. นายไพศาล จิระเรืองวงศ์
2. นายนิตพันธ์ คุณประเสริฐ
3. นายอนันต์ เถนทัศน์

อาจารย์ที่ปรึกษา

( ผศ. พิชิต สายทอง )

## การศึกษาผลกระทบในการปรับความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

นายไพศาล จิระเรืองวงศ์  
 นายนิติพันธ์ คุณประเสริฐ  
 นายอนันต์ เล่นทัศน์  
 ผศ.พิชิต ถ้ายอง อาจารย์ที่ปรึกษา  
 ปีการศึกษา 2540

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาถึงผลกระทบในการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้อินเวอร์เตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และศึกษาถึงผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ และยังรวมถึงลักษณะการบริโภคพลังงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ระหว่างอินเวอร์เตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า อีกทั้งยังรวมถึงคุณลักษณะของแรงบิดด้วย

IMPACT OF VARIABLE SPEED OF INDUCTION MOTOR

PAISAN JIRARUANGWONG

NITIPAN KHUNPRASERT

ANAN LANTUS

Asist.Prof.PICHIT LUMYONG Advisor

1997

ABSTRACT

This thesis is study about many effect of speed adjusting of induction motor such as torque, harmonics phenomena and energy consumption of if which control by inverter or a synchronus generator

## สารบัญ

|                                                                                                      | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อ                                                                                             | I    |
| ABSTRACT                                                                                             | II   |
| สารบัญภาพ                                                                                            | III  |
| สารบัญตาราง                                                                                          | VI   |
| บทที่ 1 บทนำ                                                                                         | 1    |
| บทที่ 2                                                                                              | 3    |
| 2-1 ทฤษฎีพื้นฐานของทางแม่เหล็กไฟฟ้าและการแปรรูปพลังงาน                                               | 3    |
| 2-1-1 การเปลี่ยนรูประหว่างพลังงานไฟฟ้าและพลังงานกล                                                   | 6    |
| 2-1-2 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงาน                                                                     | 7    |
| 2-1-3 พลังงานในสนามเชื่อมโยง                                                                         | 13   |
| 2-1-4 แรงซึ่งเกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าสถิตย์                                              | 21   |
| 2-2 ทฤษฎีพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ                                                       | 25   |
| 2-2-2 กระแสและเส้นแรงแม่เหล็กในเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ                                             | 28   |
| 2-2-3 วงจรสมมูลของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ                                                          | 31   |
| 2-2-4 กำลังและแรงบิด                                                                                 | 33   |
| บทที่ 3 อินเวอร์เตอร์เพื่อการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ                                              | 36   |
| 3-1 บทนำ                                                                                             | 36   |
| 3-2 โวลต์เดจซอร์จ                                                                                    | 37   |
| 3-3 เคอเรนซ์ซอร์จอินเวอร์เตอร์                                                                       | 38   |
| 3-4 เทคนิคการสร้าง PWM แบบต่างๆสำหรับอินเวอร์เตอร์                                                   | 43   |
| 3-4-1 Sinusoidal pulse width Modulation                                                              | 43   |
| 3-5 เทคนิคการกำจัดฮาร์โมนิกส์                                                                        | 49   |
| 3-6 เทคนิค Minimum Tipple Current                                                                    | 52   |
| 3-7 วิธี Adaptive Current Control PWM                                                                | 53   |
| บทที่ 4 ฮาร์โมนิกส์และผลกระทบต่อเครื่องจักรไฟฟ้า                                                     | 55   |
| 4-1 การทำงานของมอเตอร์ไฟสลับเมื่อมีฮาร์โมนิกส์                                                       | 55   |
| 4-2 ดัชนีและปริมาณต่างๆในเรื่องฮาร์โมนิกส์                                                           | 55   |
| 4-3 ผลกระทบฮาร์โมนิกส์ต่อ mmf ในการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า | 57   |

|                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4-4 วงจรสมมูลของมอเตอร์เมื่อมีฮาร์โมนิกส์                                     | 60  |
| 4-5 กระแสฮาร์โมนิกส์                                                          | 64  |
| 4-6 การสูญเสียที่มอเตอร์เมื่อใช้กับแหล่งจ่ายที่ไม่ใช่รูปไซน์                  | 65  |
| 4-6-1 การสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์                                              | 65  |
| 4-6-2 การสูญเสียที่ขดลวดโรเตอร์                                               | 66  |
| 4-6-3 การสูญเสียที่แกนเหล็กเนื่องจากฮาร์โมนิกส์                               | 66  |
| 4-7 ฮาร์โมนิกส์ของแรงบิด                                                      | 67  |
| 4-7-1 ฮาร์โมนิกส์ของแรงบิดในสภาวะสงบนิ่ง                                      | 67  |
| 4-7-2 ะลอกฮาร์โมนิกส์ของแรงบิด                                                | 68  |
| 4-8 การทำงานโดยให้ $v/f$ ที่ขั้วมีค่าคงที่                                    | 71  |
| 4-8-1 คุณลักษณะแรงบิด                                                         | 73  |
| 4-9 การทำงานเมื่อฟลักซ์ของอากาศคงที่                                          | 76  |
| 4-10 การทำงานโดยให้แรงดันมีค่าคงที่                                           | 77  |
| บทที่ 5 การคำนวณและติดตั้งเครื่องตรวจวัดแรงบิด ( torque detector )            | 80  |
| บทที่ 6 การศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพ                                     |     |
| กับการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบต่างๆ                                          | 82  |
| การทดลองควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นตัวขับ              | 82  |
| สรุปผลการทดลองบทที่ 6                                                         | 125 |
| บทที่ 7 ผลของฮาร์โมนิกส์ของแรงบิด                                             | 126 |
| การทดลองเพื่อพิสูจน์ว่าในความเป็นจริง $v/f$ ที่ความถี่ต่างๆ ให้แรงบิดไม่คงที่ | 127 |
| สรุปผลการทดลองบทที่ 7                                                         | 138 |
| บทที่ 8 แรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ                                             | 139 |
| บทที่ 9 แมคนิโคโมทิฟฟอร์สและฮาร์โมนิกส์ในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่      | 184 |
| บทที่ 10 บทวิจารณ์และสรุป                                                     | 193 |
| บทสรุปการวิจัยการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ                           | 194 |
| กิตติกรรมประกาศ                                                               |     |
| เอกสารอ้างอิง                                                                 |     |

## สารบัญภาพ

|                                                                                                    | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่ 2-1 แสดงB-H curve ของระบบไม่เชิงเส้น                                                        | 5    |
| รูปที่ 2-2 แสดงส่วนประกอบหลักของระบบไฟฟ้า-กล                                                       | 7    |
| รูปที่ 2-3 แสดงการสมดุลพลังงานในระบบไฟฟ้ากล                                                        | 9    |
| รูปที่ 2-4 แสดงระบบไฟฟ้า-กลโดยมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้า<br>ทำหน้าที่เป็นสนามเชื่อมโยง                    | 10   |
| รูปที่ 2-5 แสดงระบบไฟฟ้า-กลโดยมีสนามไฟฟ้าทำหน้าที่เป็นสนามเชื่อมโยง                                | 10   |
| รูปที่ 2-6 แสดงพลังงานสะสม                                                                         | 14   |
| รูปที่ 2-7 แสดงระบบไฟฟ้า-กล ซึ่งได้รับพลังงาน<br>จากสองระบบไฟฟ้าและหนึ่งระบบกล                     | 18   |
| รูปที่ 2-8 แสดงกราฟ แรงบิด-ความเร็วของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ                                    | 27   |
| รูปที่ 2-9 แสดงคลื่นแม่เหล็กในเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์<br>ที่เคลื่อนที่สัมพันธ์กัน | 29   |
| รูปที่ 2-10 แสดงปฏิกิริยาของโรเตอร์แบบกรงกระรอกในสนามแม่เหล็กสองขั้ว                               | 30   |
| รูปที่ 2-12 แสดงวงจรสมมูลต่อเฟสของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ                                        | 32   |
| รูปที่ 3-1 แสดงบล็อก ไดอะแกรมของระบบอินเวอร์เตอร์.<br>เพื่อการขับเคลื่อนเหนี่ยวนำ                  | 36   |
| รูปที่ 3-2                                                                                         |      |
| (a) แสดงวงจรกำลังของ 6-step อินเวอร์เตอร์                                                          |      |
| (b) แสดงรูปคลื่นทางด้านเอาต์พุตของ 6-step อินเวอร์เตอร์                                            | 39   |
| รูปที่ 3-3                                                                                         |      |
| (a) วงจรกำลังของ current source inverter                                                           |      |
| (b) แสดงแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุต                                                              | 40   |
| รูปที่ 3-4 แสดง torque speed curve ที่มีการเปลี่ยนแปลงกระแสที่สเตเตอร์                             | 42   |
| รูปที่ 3-5                                                                                         |      |
| (a) แสดงรูปคลื่น                                                                                   |      |
| (b) แสดงแรงดัน ไตน์และเฟสของPWM อินเวอร์เตอร์                                                      | 45   |

|                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูปที่ 3-6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันมูลฐาน<br>และดัชนีการมีอคติของเทคนิค SPWM                                             | 46 |
| รูปที่ 3-7 เทคนิค PWM แบบ Uniform sampling                                                                                    | 47 |
| รูปที่ 3-8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่มูลฐาน<br>และความถี่สวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์                                           | 49 |
| รูปที่ 3-9 แสดงรูป PWM โดยวิธีกำจัดฮาร์โมนิกส์                                                                                | 49 |
| รูปที่ 3-10                                                                                                                   |    |
| (a) แสดงหลักการการเกิดรูปคลื่น PWM<br>โดยเทคนิค Adaptive Current Control                                                      | 53 |
| (b) แสดงวงจรควบคุมเทคนิค Adaptive Current Control                                                                             | 54 |
| รูปที่ 4-1                                                                                                                    |    |
| (a) เฟสเซอร์ไคอะแกรมขององค์ประกอบมูลฐาน                                                                                       | 58 |
| (b) เฟสเซอร์ไคอะแกรมของ $I_u$ , $I_v$ , $I_w$ ฮาร์โมนิกส์ที่ 3                                                                | 59 |
| (c) เฟสเซอร์ไคอะแกรมของฮาร์โมนิกส์ที่ 5                                                                                       | 59 |
| (d) เฟสเซอร์ไคอะแกรมของฮาร์โมนิกส์ที่ 7                                                                                       | 60 |
| รูปที่ 4-2 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ                                                                                       | 63 |
| รูปที่ 4-3 วงจรสมมูลอย่างประมาณสำหรับคำนวณหากระแสฮาร์โมนิกส์                                                                  | 63 |
| รูปที่ 4-4 เฟสเซอร์ไคอะแกรมขององค์ประกอบมูลฐาน,<br>ฮาร์โมนิกส์ที่ 5, 7 เข้าด้วยกัน                                            | 70 |
| รูปที่ 4-5 คุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็วรอบของการทำงานของ<br>มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ปรับความถี่ด้วยการให้อัตราส่วน $v/f$ มีค่าคงที่ | 75 |
| รูปที่ 4-6 คุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็วรอบของการทำงานของ<br>มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ปรับความถี่ได้โดยการควบคุมให้ฟลักมีค่าคงที่     | 78 |
| รูปที่ 4-7 แสดงเส้นกราฟระหว่างแรงบิดกับความเร็วที่มีการปรับแรงดัน<br>และปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์                           | 78 |
| รูปที่ 4-8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและความถี่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ                                                             | 79 |
| รูป ชุดเครื่องวัดแรงบิด                                                                                                       | 80 |
| รูปที่ 6.1 แสดงวิธีการต่อวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์<br>โดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นตัวขับ                                      | 82 |

|                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----|
| รูปที่ 6.2 ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำจากการจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิด | 99  |
| รูปที่ 6.3 ประสิทธิภาพของระบบจากการจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิด             | 100 |
| รูปที่ 6.4 แสดงวิธีการต่อวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์โดยใช้อินเวอร์เตอร์          | 101 |
| รูปที่ 6.5 ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำจากการจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยอินเวอร์เตอร์ | 121 |
| รูปที่ 6.6 ประสิทธิภาพของระบบจากการจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยอินเวอร์เตอร์             | 122 |
| รูปที่ 6.7 ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำจากแหล่งจ่ายสองระบบ                   | 123 |
| รูปที่ 6.8 ประสิทธิภาพของระบบจากแหล่งจ่ายสองระบบ                               | 124 |
| รูปการทดลองที่ 7.1                                                             | 127 |
| รูปที่ 7.2 เปอร์เซนต์ฮาร์โมนิกส์กระแสที่ความถี่ต่างๆ                           | 137 |
| รูปที่ 8.1 การขั้มอเตอร์เหนี่ยวนำโดยอินเวอร์เตอร์                              | 139 |
| รูปที่ 8.2 แสดงแรงบิด-ความเร็วรอบจากการจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยอินเวอร์เตอร์         | 157 |
| รูปที่ 8.3 การขั้มอเตอร์เหนี่ยวนำโดยระบบไฟฟ้าทั่วไป                            | 158 |
| รูปที่ 8.4 แสดงแรงบิด-ความเร็วรอบจากการจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยระบบไฟฟ้า             | 172 |
| รูปที่ 8.5 แสดงการบริโภคกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำจากแหล่งจ่ายสองระบบ       | 175 |
| รูปที่ 8.6 แสดงการบริโภคกำลังงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำจากแหล่งจ่ายสองระบบ         | 176 |
| รูปที่ 8.7 แสดง Power Factor ของมอเตอร์เหนี่ยวนำจากแหล่งจ่ายสองระบบ            | 177 |
| รูปที่ 8.8 แสดงประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำจากแหล่งจ่ายสองระบบ               | 178 |
| รูปที่ 8.9 แสดงแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำจากแหล่งจ่ายสองระบบ                    | 179 |
| รูปวงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำ                                                   | 182 |
| รูปที่ 9.1 การต่อวงจรเพื่อวัดค่ากระแสกระตุ้น                                   | 184 |
| รูปที่ 9.2 เปอร์เซนต์ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆที่ความถี่ 40 Hz                     | 186 |
| รูปที่ 9.3 เปอร์เซนต์ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆที่ความถี่ 50 Hz                     | 187 |
| รูปที่ 9.4 เปอร์เซนต์ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆที่ความถี่ 60 Hz                     | 188 |
| รูปที่ 9.5 เปอร์เซนต์ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆที่ความถี่ 70 Hz                     | 189 |
| รูปที่ 9.6 เปอร์เซนต์ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆที่ความถี่ 80 Hz                     | 190 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

|                                                                                                   | หน้า    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| ตารางแสดงผลการทดลองที่ 6.1                                                                        | 84-97   |
| ตารางที่ 6.15 แสดงประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อใช้เจนเอเรเตอร์<br>เป็นตัวควบคุมความเร็วรอบ  | 98      |
| ตารางแสดงผลการทดลองที่ 6.2                                                                        | 102-119 |
| ตารางที่ 6.34 แสดงประสิทธิภาพของอินดักชันมอเตอร์<br>เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์เป็นตัวควบคุมความเร็วรอบ | 120     |
| ตารางแสดงผลการทดลองบทที่ 7                                                                        | 128-135 |
| ตารางที่ 7.9 แสดงลำดับฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ต่างๆ                                                  | 136     |
| ตารางแสดงผลการทดลองบทที่ 8.1                                                                      | 141-155 |
| ตารางที่ 8.16 แรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบต่างๆ เมื่อ<br>ใช้ไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์      | 156     |
| ตารางแสดงผลการทดลองบทที่ 8.2                                                                      | 159-170 |
| ตารางที่ 8.29 แรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบต่างๆ<br>เมื่อใช้ไฟฟ้าจากระบบ                | 171     |
| ตารางที่ 8.30 ข้อมูลของการจ่ายกำลังงานโดยระบบ                                                     | 173     |
| ตารางที่ 8.31 ข้อมูลของการจ่ายกำลังงานโดยอินเวอร์เตอร์                                            | 174     |
| ตารางที่ 9-1แสดงเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกส์กระแสที่ความถี่ต่างๆ                                        | 185     |
| ตารางที่ 9-2 แสดงปริมาณกระแสกระตุ้นและกำลังงานที่ความถี่ต่างๆ                                     | 185     |

## บทที่ 1

## บทนำ

ปัจจุบันในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป ที่มีระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ ต้องการความมีประสิทธิภาพและเสถียรภาพสูงราคาของระบบต่ำและมีความซับซ้อนของระบบ ควบคุมไม่มากเกินไปนัก โดยส่วนใหญ่แล้วระบบที่ใช้กันอย่างแพร่หลายก็คือใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่ถูกควบคุมโดย อินเวอร์เตอร์(Inverter) แบบ PWM ซึ่งเป็นระบบที่ออกแบบให้อัตราส่วนของ  $v/f$  คงที่ มีผลทำให้ปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กในช่องอากาศมีค่าคงที่เมื่อทำงานในย่านแรงบิดคงที่ (Constant torque region ) ทำให้เราสามารถควบคุมความเร็วได้โดยที่คุณลักษณะของแรงบิดไม่ เปลี่ยนแปลงไป นั่นคือเส้นโค้งภาระที่ความถี่ต่างๆจะมีลักษณะคล้ายกัน นอกจากนี้แล้วยังมีผล ของ ฮาร์โมนิกส์(Harmonics) ที่จะเกิดจากระบบควบคุมมีค่าที่ลำดับของ ฮาร์โมนิกส์ ลำดับสูงๆซึ่ง มีค่าน้อยมาก ซึ่งถือว่าที่ลำดับสูงๆแล้วจะมีขนาด( Amplitude )น้อยมากซึ่งเป็นข้อดีของ อินเวอร์ เตอร์ แบบ PWM แต่เราไม่มีการศึกษาในส่วนของตัวเครื่องจักรเลยว่าจากการปรับความเร็วแบบ ใช้อัตราส่วน  $v/f$  คงที่แบบ PWM จะส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะของเครื่องจักรอย่างไร บ้าง เพราะว่าโดยทั่วไปแล้วคุณลักษณะของเครื่องจักรที่ทำการศึกษาจะเป็นข้อมูลในลักษณะที่ ทำงานในพิกัดแรงดัน, กระแสและความถี่ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วเมื่อใช้การปรับความเร็วแบบนี้ แล้วตัวแปรเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงไป โดยเราจะต้องทำการวิเคราะห์ว่าแบบจำลองของเครื่องจักร เมื่อนำมาใช้งานในขอบเขตที่แตกต่างออกไปจากที่พิกัดที่ออกแบบไว้จะส่งผล อย่างไรต่อการ ทำงานของเครื่องจักรบ้างเพราะจากการศึกษาในส่วนของคุณลักษณะพื้นฐานแล้วพบว่าในขณะที่เครื่อง จักร ทำงานที่พิกัดออกแบบแล้วองค์ประกอบบางส่วนได้ถูกละเลยไปเพราะว่าที่พิกัดองค์ประกอบ เหล่านี้จะมีค่าน้อยมากจนเราสามารถตัดทิ้งไปได้โดยไม่ได้ทำให้แบบจำลองของเครื่องจักรมีความ ผิดพลาดแต่อย่างใด แต่เราพบว่าในการใช้อุปกรณ์ปรับความเร็วแบบ PWM จะให้องค์ประกอบ ที่ต่างไปจากที่เครื่องจักรเคยได้รับซึ่งมีผลทำให้คุณลักษณะของ เครื่องจักรแตกต่างไปจากที่ออก แบบไว้ซึ่งเราจะต้องศึกษาว่ามีผลกระทบเกิดขึ้นในด้านใดบ้าง โดยจะทำการศึกษาดังแต่คุณลักษณะ พื้นฐานของระบบแม่เหล็กระบบการแปรรูปพลังงาน คุณลักษณะพื้นฐานของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ คุณลักษณะพื้นฐานของ อินเวอร์เตอร์แบบ PWM คุณลักษณะพื้นฐานของการปรับความเร็วของเครื่องจักร ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้ อินเวอร์เตอร์ แบบ PWM คุณลักษณะพื้นฐานของการเกิดฮาร์โมนิกส์ ใน เอาท์พุท(Output) ของ อินเวอร์เตอร์ แบบ PWMซึ่งในส่วนของคุณลักษณะพื้นฐานเหล่านี้จะแสดงผล กระทบที่เกิดขึ้นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ผลกระทบจาก ฮาร์โมนิกส์ ว่าส่งผลกระทบอย่างไรออกมาบ้าง
- วงจรสมมูลของ เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเป็นอย่างไร
- ลักษณะการบริโภคพลังงานของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อใช้ การปรับความเร็วแบบ v/f โดยเปรียบเทียบระหว่างใช้ อินเวอร์เตอร์ กับใช้ จิงโครนัส เจเนอเรเตอร์ (Synchronous Generator) เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยคงลักษณะอัตราส่วน v/f ไว้ ว่าจะมีลักษณะเช่นไรเปรียบเทียบกัน

ในความเป็นจริงแล้วการวิเคราะห์หัวข้อทำนองนี้ นับว่ามีคุณค่าทางวิศวกรรมสูงและนำมาใช้ประโยชน์ได้เป็นอย่างดี เนื่องจากผลกระทบที่เกิดขึ้นนั้นทำให้ในส่วนของผู้ทำงานด้านออกแบบอุปกรณ์ปรับความเร็วและส่วนของผู้ออกแบบเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ มีความเข้าใจในผลที่เกิดขึ้นและ นำไปเป็นข้อมูลในการพัฒนาต่อไปเพื่อไปสู่เป้าหมายที่ว่า ทำอย่างไรให้เราใช้ทรัพยากรที่มีอยู่จำกัดให้เกิดประโยชน์สูงสุดและเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่ดีให้น้อยที่สุด

โดยเนื้อหาของหัวข้อปริญญานิพนธ์นี้มีขอบเขตที่กว้างและลึกมากซึ่งโดยในระดับคุณวุฒินิพนธ์ก็สามารถนำขึ้นมาเป็นหัวข้อในการบรรยายได้ ในส่วนของปริญญานิพนธ์เล่มนี้ได้อธิบายถึงในบางส่วนเท่านั้นซึ่งอาจใช้เป็นแนวทางในการศึกษาทั้งในด้านกว้างและลึกยิ่งขึ้นไปซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจเป็นอย่างดี

## บทที่ 2

## 2-1 ทฤษฎีพื้นฐานทางแม่เหล็กไฟฟ้าและการแปรรูปพลังงาน

ตัวแปรในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะประกอบด้วยองค์ประกอบหลายๆตัว และในหลายตัวนั้นจะขึ้นอยู่กับตัวกลางทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปพารามิเตอร์ ต่างๆของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลางใดๆจะเป็นปริมาณ เทนเซอร์(Tensor) เป็นผลให้คลื่นความเข้มแม่เหล็กไฟฟ้ากับคลื่นความหนาแน่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีการเลื่อนให้ตำแหน่งต่างกัน (Shift) อย่างไรก็ตามในกรณีการศึกษาแบบมหภาค(Macroscopic) ตัวแปรที่มีผลมากที่สุดก็คือ ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กแมกเนติกฟิลด์ อินเทนซิตี(Magnetic field intensity)  $H$  เราจะศึกษาโดยให้ความสำคัญกับ พารามิเตอร์ (Parameter) ตัวนี้มากที่สุด

เมื่อเราให้ความเข้มสนามไฟฟ้า (Electric field intensity)  $E$  เข้าไปในฉนวนจะเกิดความหนาแน่นเส้นแรงไฟฟ้า(Electric field density)  $D$  ขึ้นเมื่อเราจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปในฟรีสเปซ (Free space)เป็นการทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จะเกิดความเข้มสนามแม่เหล็ก  $H$  ขึ้นในฟรีสเปซนั้น ค่าความซึมซาบแม่เหล็กจะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของวัสดุแม่เหล็กในกรณีเครื่องจักรไฟฟ้า เหนียวนาหรือเครื่องจักรกลไฟฟ้าทั่วไปเราจะใช้วัสดุ เฟอโรแมกเนติก(Ferromagnetic) เพราะมีค่าความซึมซาบแม่เหล็กสูงมาก(2,000-80,000)[1] ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของ  $H$  กับขนาดของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก  $B$  (Magnetic field density) จะแสดงได้ด้วย B-H curve ในตัวกลางใดๆจะเห็นว่าที่ค่า  $H$  ค่าเดียวกันค่าของ  $B$  ในระบบที่ความสัมพันธ์ของ B-H ไม่เป็นเชิงเส้นจะให้ค่าของ  $B$  สูงกว่าที่ได้ในระบบที่มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นเช่นในอากาศมาก นี่เป็นเหตุผลที่ว่าทำไมอุปกรณ์แม่เหล็กไฟฟ้าจึงต้องใช้ตัวกลางในการส่งผ่านพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นวัสดุ เฟอโรแมกเนติก เพราะว่าป็นระบบไม่เชิงเส้นเพราะเราจ่ายกระแสที่สร้าง  $H$  เท่ากันแต่จะให้  $B$  ที่สูงกว่าในระบบเชิงเส้นมาก แต่เราก็ต้องการให้ความสัมพันธ์ที่แทนเป็นตัวแปรในแบบจำลองของระบบแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น เมื่อเราพิจารณาจากรูปที่ 2-1 จะพบว่าในบางช่วงความสัมพันธ์ของ B-H ในวัสดุ เฟอโรแมกเนติก มีความสัมพันธ์ที่ค่อนข้างจะเป็นเชิงเส้นดังนั้นถ้าเราออกแบบให้ระบบแม่เหล็กไฟฟ้าทำงานในย่านนี้จะถือว่าเป็นระบบเชิงเส้นได้ คุณสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุ เฟอโรแมกเนติก เราอธิบายได้จากทฤษฎี โดเมน (Domain) ของ Weiss[2] ซึ่งกล่าวว่า เมื่อเราพิจารณาวัสดุแม่เหล็กในระดับอะตอมจะประกอบด้วย โดเมนแม่เหล็กขนาดเล็ก(Domain miniature permanent magnet) ที่เกิดจากกระแสพื้นฐาน

(Elementary current) ซึ่งเกิดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่รอบนิวเคลียสและเคลื่อนที่รอบตัวเอง ซึ่งวางตัวขนานกันและวางตัวอยู่ในลักษณะสุ่ม (Random) เมื่อไม่มีสนามภายนอกมากระทำจะทำให้

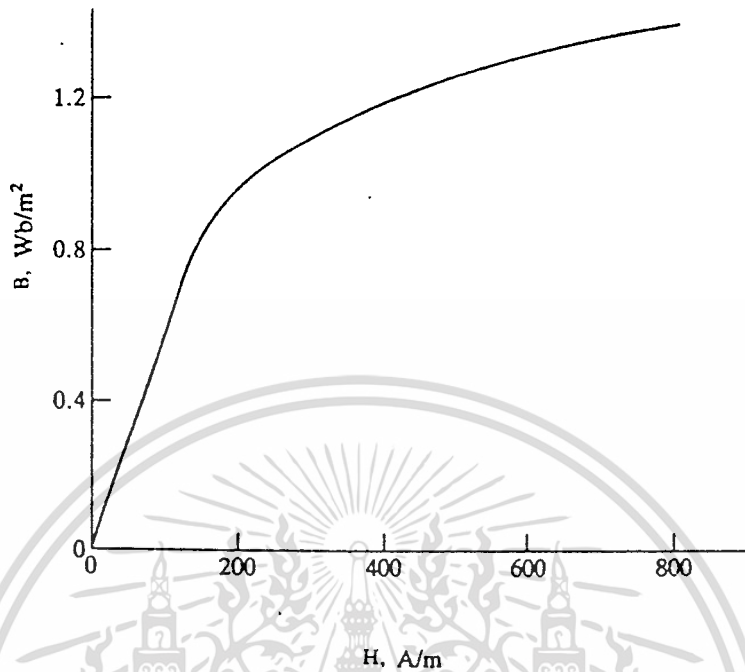
มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กเป็นกลางเมื่อมีสนามภายนอกเข้ามากระทำจะทำให้ แมกเนติกไดโพล โมเมนต์ ภายในเนื้อสารจะเสริมกับสนามภายนอกทำให้ โดเมน แม่เหล็กภายในเนื้อสารวางตัวไปในทิศทางเดียวกับสนามภายนอกมีผลทำให้ค่าของ  $B$  ในเนื้อสารมีค่าสูงกว่าที่เกิดจากสนามภายนอกเพียงอย่างเดียว นั่นก็หมายความว่า โดเมน แม่เหล็กจะรองรับสนามแม่เหล็กซึ่งเราเรียกความสามารถนี้ของวัสดุแม่เหล็กในรูปตัวแปรที่ชื่อว่า  $\mu_r$  หรือกล่าวได้อีกอย่างว่า  $\mu_r$  คืออัตราส่วนของค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กรวม(Total  $B$ ) ที่เกิดขึ้นในวัสดุแม่เหล็กต่อค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่จ่ายเข้าไปค่าของ  $\mu_r$  จะไม่มีหน่วย ส่วนหน่วยที่เราใช้วัดความเข้มของ โดเมน เรียกว่า แมกเนติกไดโพลโมเมนต์  $M$  ปรากฏการณ์การเรียงตัวของโดเมน แม่เหล็กนี้จะเกิดขึ้นจนกว่า โดเมนแม่เหล็กที่มีจะเรียงตัวเกือบหมดที่จุดนี้จะพบว่าค่า  $B$  ในเนื้อสารจะไม่เพิ่มขึ้นเท่าไรแม้ว่าเราจะเพิ่มค่าของสนามภายนอกขึ้นอีกก็ตามเราเรียกว่าเกิดการอิ่มตัวของวัสดุแม่เหล็ก (Saturated) ในขณะนี้ถ้าเรายุติการจ่ายสนามภายนอกให้กับเนื้อสาร โดเมนแม่เหล็กจะคลายตัวลงก็จะวางตัวตามสภาพแม่เหล็กในปัจจุบันของเนื้อสารซึ่งตามทฤษฎีคือ จะวางตัวตามแนวที่เป็นแม่เหล็กง่ายตามโครงสร้างอะตอมรูปผลึกของวัสดุแม่เหล็กซึ่งมีผลทำให้ แมกเนติกไดโพลโมเมนต์  $M$  จะยังคงวางตัวอยู่ในแนวการเป็นแม่เหล็กที่ง่ายที่สุดที่ใกล้ที่สุดผลก็คือ จะเกิดสภาพที่เรียกว่า แมกเนติก ฮิสเตอร์ิซิส (Magnetic hysteresis) คือแม้ว่าเราจะนำเอาสนามภายนอกออกไปแล้วแต่ โดเมน แม่เหล็กก็จะไม่คืนกลับไปสู่สภาพการวางตัวแบบสุ่มทั้งหมดทำให้เกิดสภาพเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างในเนื้อสารขึ้นความสัมพันธ์ของ แมกเนติกฟิลด์อินเทนสิตี้  $H$  และ เคอร์เรนท์ เดนสิตี้(Current density)  $J$  ที่เป็นต้นกำเนิดสนามแม่เหล็ก  $H$  นี้ขึ้นมาจะเป็นไปตามสมการนี้

$$\nabla \times H = J \quad (2-1)$$

ซึ่งในการวิเคราะห์เครื่องจักรกลไฟฟ้าต่างๆ ไปจะกำหนดปริมาณที่ไม่มีควมหมายทางฟิสิกส์ขึ้นมาค่าหนึ่งที่ใช้เป็นค่าแทนปริมาณสเกลลา(Scalar)ทางแม่เหล็กขึ้นมาค่าหนึ่งนั่นคือแมกนีโตโมทีฟฟอร์ส(Magnetomotive force)  $F$  ใช้ตัวย่อว่า mmf มีความสัมพันธ์กับ ความเข้มสนามแม่เหล็ก  $H$  ดังนี้

$$\oint H \cdot dl = mmf \quad (2-2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-1ก แสดง B-H curve ของระบบไม่เชิงเส้น

พลังงานคือความสามารถที่จะทำงานได้ ในแง่ทางกลศาสตร์ มวลใดๆอาจมีพลังงานได้สองชนิดคือ

1. พลังงานศักย์ ซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งของมวล และ/หรือ
2. พลังงานจลน์ ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพการเคลื่อนที่ของมวล

ในทำนองเดียวกัน ประจุไฟฟ้าใดๆ ก็มีลักษณะพลังงานได้สองชนิด คือ

1. ประจุไฟฟ้านิ่ง ซึ่งมีผลทำให้เกิดสนามไฟฟ้าสถิต ซึ่งมีพลังงานไฟฟ้าสถิตอันเนื่องมาจากศักดาไฟฟ้า
2. ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ ซึ่งมีผลทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้านั้นในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

## 2-1-1 การเปลี่ยนรูประหว่างพลังงานไฟฟ้าและพลังงานกล

อุปกรณ์ที่ทำงานด้วยหลักการเปลี่ยนรูประหว่างพลังงานไฟฟ้าและพลังงานกลมีอยู่หลายชนิดดังนี้

1. แรงแทงกลศาสตร์จากผลของสนามแม่เหล็ก เช่นแรงในแท่งตัวนำที่มีกระแสไหลภายใต้สนามแม่เหล็ก
2. แรงที่เกิดขึ้นในสารแม่เหล็กชนิด เฟอร์โรแมกเนติก ซึ่งทำให้เนื้อสารนั้นเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ความเข้มสนามแม่เหล็กภายในเนื้อสารจะเพิ่มมากขึ้น เช่นการวางตัวของเข็มทิศตามทิศสนามแม่เหล็กโลก หรือรีเลย์(Relay)ชนิดดูดอาเมเจอร์(Armature)
3. แรงที่เกิดขึ้นเหมือนข้อ(1) จากสนามไฟฟ้า
4. แรงที่เกิดขึ้นเหมือนข้อ(2) จากสนามไฟฟ้า
5. แมกนีโต สตริกชัน การยืดหดของสาร เฟอร์โรแมกเนติก ในสนามแม่เหล็ก
6. แรงที่เกิดขึ้นเหมือนข้อ(5) จากสนามไฟฟ้า เช่นกรณีผลจาก เพียโซอิเล็กตริก

แรงที่ได้จากในข้อ(3)ถึง(6)จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับข้อ(1)และ(2) ดังนั้นอุปกรณ์ไฟฟ้าส่วนใหญ่จะใช้สองวิธีแรก[3]

### 2-1-2 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงาน[4]

ระบบไฟฟ้า-กล (Electromechanical system) จะประกอบด้วยไฟฟ้าและระบบกลที่ทำงานสัมพันธ์กันและถ่ายทอด(Transfer)พลังงานระหว่างกันโดยมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic field) หรือสนามไฟฟ้าสถิต (Electrostatic field) ทำหน้าที่เป็นสนามเชื่อมโยง ดังรูปที่ 1-2 โดยมีข้อกำหนดคือไม่มีการแผ่กระจาย (Radiation) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และความถี่ในระบบไฟฟ้าต่ำมากพอที่จะทำให้พิจารณาได้ว่าระบบไฟฟ้ามี พารามิเตอร์แบบลัมพ์(Lump parameter)



การสูญเสียพลังงานเกิดขึ้นในทุกส่วนของระบบ เช่น การสูญเสียทางความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบกล เนื่องมาจากแรงเสียดทาน และที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า เนื่องมาจากความต้านทานของตัวนำที่มีกระแสไหล การสูญเสียในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเนื่องจากการแผ่คลื่น และ ฮิสเตอร์สิส ลอสส์ ที่เกิดขึ้นในวัสดุแม่เหล็กหรือการสูญเสียในสนามไฟฟ้าเนื่องจาก ไดอิเล็กตริก ลอสส์ ดังนั้นสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$W_E = W_s + W_{el} + W_{es} \quad (2-3)$$

$$W_M = W_m + W_{ml} + W_{ms} \quad (2-4)$$

โดยที่  $W_E$  : พลังงานทั้งหมดที่ป้อนเข้าสู่ระบบไฟฟ้า-กล โดยแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า

$W_M$  : พลังงานทั้งหมดที่ป้อนเข้าสู่ระบบไฟฟ้า-กล โดยแหล่งจ่ายพลังงานกล

$W_{el} (W_{ml})$  : การสูญเสียทางความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า (ระบบกล)

$W_{es}$  : พลังงานสะสมในสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กที่ไม่ได้เข้าสู่การแปรรูปพลังงาน

$W_{ms}$  : พลังงานสะสมที่เคลื่อนที่และไม่ได้เข้าสู่การแปรรูปพลังงาน

$W_e (W_m)$  : พลังงานที่ถ่ายทอดจากระบบไฟฟ้า(ระบบกล) สู่สนามเชื่อมโยง

ซึ่งจะกำหนดให้  $W_E (W_M)$  เป็นค่าบวก, ในกรณีที่ระบบไฟฟ้า (ระบบกล) ได้รับพลังงานจากแหล่งจ่ายพลังงาน (source) และ  $W_E (W_M)$  เป็นค่าลบ, ในกรณีที่ระบบไฟฟ้า (ระบบกล) จ่ายพลังงานกลับให้แก่แหล่งจ่ายพลังงาน

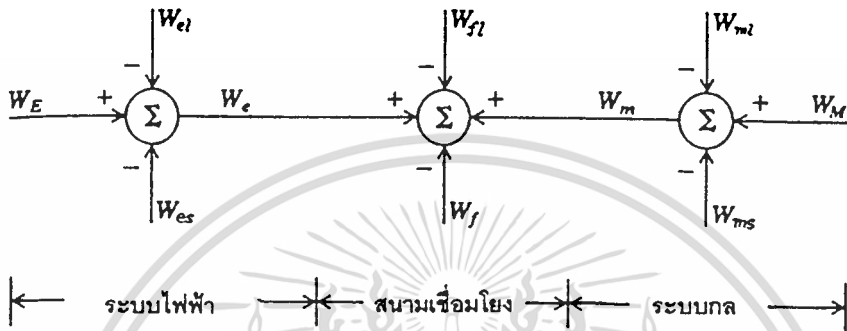
ถ้ากำหนดให้  $W_F$  เป็นพลังงานรวมที่เข้าสู่สนามเชื่อมโยง จะเขียนได้ดังนี้

$$W_F = W_e + W_m \quad (2-5)$$

$$\text{และ} \quad = W_F + W_\eta \quad (2-6)$$

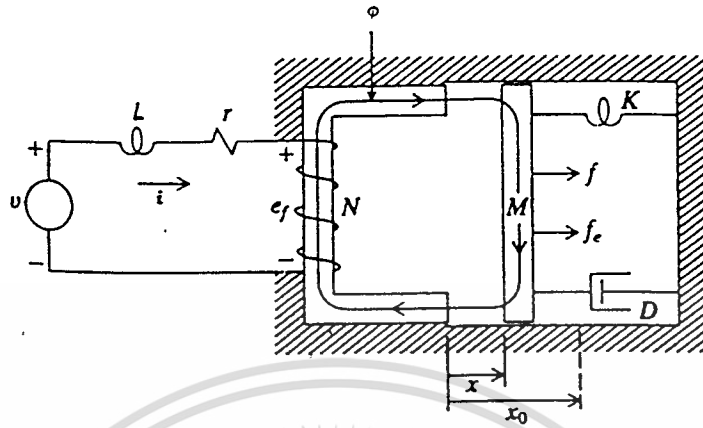
เอกสารโดยที่  $W_F$  พลังงานที่ส่งวน: พลังงานสะสมในสนามเชื่อมโยงนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะเป็น  $W_\eta$  ทั้งสิ้น อีกทั้ง พลังงานที่สูญเสียในรูปความร้อนภายในสนามเชื่อมโยงทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่อธิบายในตอนต้นนั้นสามารถนำมาเขียนการสมดุลพลังงานได้ดังรูปที่ 2-3

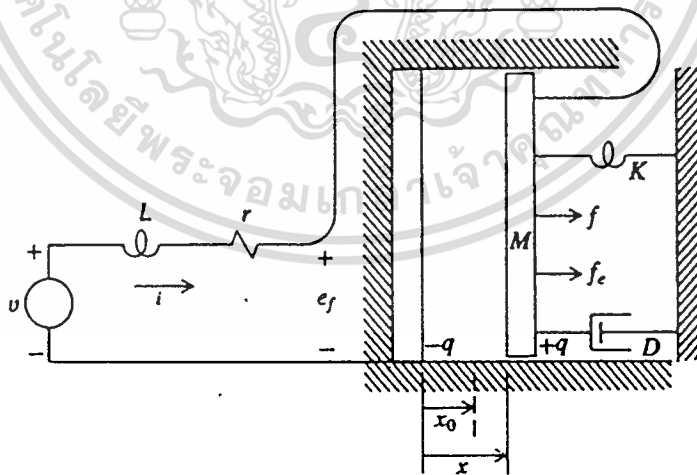


รูปที่ 2-3 แสดงการสมดุลพลังงานในระบบไฟฟ้ากล

จากสมการ(2-5)และ(2-6)จะเห็นได้ว่า การเปลี่ยนรูประหว่างพลังงานไฟฟ้าและพลังงานกลจะขึ้นอยู่กับพลังงานสะสมในสนามเชื่อมโยง,  $W_f$  เท่านั้น  
ตัวอย่างของระบบ ไฟฟ้า-กล สำหรับเป็นพื้นฐานของความเข้าใจแสดงได้ดังรูปที่ 2-4 และ 2-5



รูปที่ 2-4 แสดงระบบไฟฟ้า-กล โดยมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทำหน้าที่เป็นสนามเชื่อมโยง



รูปที่ 2-5 แสดงระบบไฟฟ้า-กล โดยมีสนามไฟฟ้าทำหน้าที่เป็นสนามเชื่อมโยง

ในระบบทั้งสองที่แสดงในรูปที่ 2-4, 2-5 นั้นมีความหมายของสัญลักษณ์ดังนี้

- $v$  : แรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า  
 $f$  : แรงภายนอกที่กระทำต่อระบบกล, โดยแหล่งจ่ายพลังงานกล  
 $f_c$  : แรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า รูป 2-4 หรือสนามไฟฟ้า รูป 2-5  
 $r$  : ความต้านทานของตัวนำที่มีกระแสไหล  
 $L$  : inductance ของระบบแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งไม่เชื่อมโยงกับระบบกล  
 $M$  : มวลที่เคลื่อนที่ในระบบกล  
 $K, D$  : ค่าคงที่ของสปริง (Spring constant) และ ค่าสัมประสิทธิ์การแดมป์ ตามลำดับ  
 $X_0$  : การเคลื่อนที่ (หรือตำแหน่ง) ของระบบกล ในภาวะคงตัวซึ่งเป็นขณะที่  $f_c$  และ  $f$  มีค่าเป็นศูนย์

สมการแรงดันไฟฟ้า ซึ่งอธิบายระบบไฟฟ้าคือ

$$V = ri + L \frac{di}{dt} + e_r \quad (2-7)$$

โดยที่  $e_r$  : แรงดันตกคร่อมสนามเชื่อมโยง

การเคลื่อนที่ของระบบกล สามารถถูกอธิบายได้ด้วยกฎการเคลื่อนที่ของ Newton

$$f = M \frac{d^2 x}{dt^2} + D \frac{dx}{dt} + K(x - x_0) - f_c \quad (2-8)$$

พลังงานทั้งหมดที่ป้อนเข้าสู่ในสนามไฟฟ้า คือ

$$W_E = \int vi \, dt \quad (2-9)$$

พลังงานกลทั้งหมดที่ป้อนเข้าสู่ระบบกล คือ

$$W_M = \int f \, dx \quad (2-10)$$

เอกสารนี้เป็นหรือที่สงวนไว้สำหรับ  $W_M = \int f \frac{dx}{dt} dt$  เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์การคำนวณการคำนวณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการ (2-7) ลงใน (2-9) จะได้

$$W_E = r \int i^2 dt + L \int i dt + \int e_f i dt \quad (2-12)$$

ซึ่งเทอม  $r \int i^2 dt$  คือ พลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากความต้านทานของตัวนำ ( $W_d$ ) และเทอม  $L \int i dt$  คือ พลังงานสะสมในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ( $W_m$ ) ซึ่งไม่เชื่อมโยงกับระบบกล ดังนั้น พลังงานทั้งหมดที่ระบบไฟฟ้าส่งเข้าสู่สนามเชื่อมโยง คือ

$$W_o = \int e_f i dt \quad (2-13)$$

ในทำนองเดียวกัน เมื่อแทนสมการ (2-8) ลงในสมการ (2-11) จะได้

$$W_M = M \int \frac{d^2 x}{dt^2} dx + D \int \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 dt + K \int (x - x_o) dx - \int f_o dx \quad (2-14)$$

เทอมแรกและเทอมที่ 3 ในสมการ (2-14) คือพลังงานสะสมในมวลและสปริงตามลำดับ ( $W_m$ ) ซึ่งไม่เชื่อมโยงกับระบบไฟฟ้า เทอมที่ 2 คือพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน ( $W_m$ ) ดังนั้นพลังงานทั้งหมดที่ระบบกลส่งเข้าสู่สนามเชื่อมโยง คือ

$$W_m = - \int f_o dx \quad (2-15)$$

ถ้าเรากำหนดให้แรง  $f_o$  เป็นบวกในกรณีที่มีทิศทางการเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนที่ (displacement)

x

ดังนั้น

$$W_p = \int e_f i dt - \int f_e dx \quad (2-16)$$

ในกรณีที่ ไม่เกิดการสูญเสียพลังงานในสนามเชื่อมโยง ( $W_n = 0$ ) (Conservative coupling field) จะได้

$$W_f = W_e + W_m \quad (2-17)$$

$$= \int e_f i dt - \int f_e dx \quad (2-18)$$

พลังงานรวมในสนามเชื่อมโยง ซึ่งเกิดจากระบบไฟฟ้าจำนวน J, และระบบกลจำนวน K, จะมีค่า

$$W_f = \sum_{j=1}^J W_{f_j} + \sum_{k=1}^K W_{mk} \quad (2-19)$$

### 2-1-3 พลังงานในสนามเชื่อมโยง

โดยปกติ วัสดุที่ใช้ในระบบไฟฟ้า-กล จะถูกเลือกและจัดวางเรียงกันในลักษณะที่ทำให้เกิดการสูญเสีย เนื่องจากกระแสไหลวน และ ฮิสเตอร์สิส ค่าที่สุด และพลังงานสะสมจะอยู่ภายในช่องอากาศ (Air gap) ของอุปกรณ์ระบบไฟฟ้า-กล ซึ่งอากาศก็เป็นตัวกลางที่มีลักษณะเป็น คอนเซอร์เวทิฟ ดังนั้นพลังงานทั้งหมดที่สะสมอยู่จะสามารถถ่ายกลับไปยังระบบไฟฟ้า หรือระบบกลได้โดยไม่เกิดการสูญเสียด้วยเหตุผลนี้ทำให้สมมติได้ว่า ไม่เกิดพลังงานสูญเสียในสนามเชื่อมโยง (Lossless coupling field) ผลที่ได้ตามมาก็คือ ค่าพลังงานสะสมจะเป็นฟังก์ชันกับสถานะของตัวแปรทางไฟฟ้า และทางกลเท่านั้น ดังนั้นในขณะที่มีการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้แก่ระบบ และเกิดแรงแม่เหล็กไฟฟ้า หรือ แรงเนื่องจากไฟฟ้าสถิตขึ้น[5] ก็จะสามารถสมมติในทางคณิตศาสตร์ให้การเคลื่อนที่ทางกล  $dx$  เป็นศูนย์ได้นั่นคือ  $W_{mk} = 0$  จากสมการ (2-18) และ (2-19) โดยที่พิจารณาให้  $J=1$  จะได้ว่า

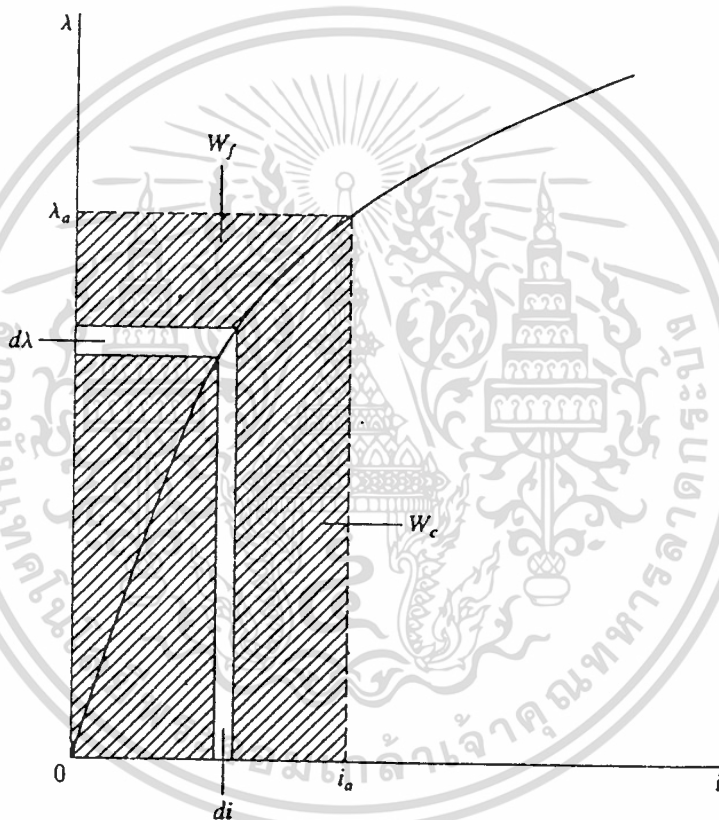
$$W_f = \int e_f i dt \quad (2-20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีนี้  $e_r = d\lambda/dt$  และแทนลงในสมการ (2-20) จะได้

$$W_f = \int i d\lambda \quad (2-21)$$

ซึ่งคือ พื้นที่ส่วนหนึ่งในกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เส้นแรงแม่เหล็กเกือบวงล้อ,  $\lambda$  และ กระแส  $i$  ดังรูปที่ 2-6



รูปที่ 2-6 แสดงพลังงานสะสม  $W_f$  energy, และ  $W_c$  co-energy ในสนามแม่เหล็ก โดยที่  $W_m = 0$

ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง  $\lambda$  และ  $i$  ไม่จำเป็นต้องอยู่ในลักษณะเชิงเส้น แต่จะต้องมีค่าเดียวที่ คู่ลำดับ  $\lambda, i$  ค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นคุณสมบัติของสนามแบบอนุรักษ์ (conservative) พื้นที่ใต้กราฟ ในรูปที่ 2-6 เรียกว่า co-energy,  $W_c$

ซึ่ง

$$W_c = \int \lambda di \quad (1-22)$$

เอกสารนี้หรือเอกสารที่สงวนไว้สำหรับเราใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 หรือ  $W_c = \lambda i - W_f \quad (2-23)$   
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จริงๆแล้ว co-energy ไม่มีความหมายทางฟิสิกส์ แต่ช่วยให้เราคำนวณหาค่าทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้สะดวกขึ้นเท่านั้นเพื่อที่จะอธิบายถึงสถานะ(state) ของระบบไฟฟ้า-กล จำเป็นจะต้องพิจารณาถึงการเคลื่อนที่ทางกล  $x$  ด้วย ทั้งนี้เนื่องจากการเคลื่อนที่  $x$  แสดงถึงผลของสนามเชื่อมโยงที่มีต่อ

$$W_f = W_f(i, x) \quad (2-24)$$

$$\lambda = \lambda(i, x) \quad (2-25)$$

ระบบได้อย่างสมบูรณ์แบบ จากการกำหนดให้  $i$  และ  $x$  เป็นตัวแปรอิสระต่อกัน (independent variables) ทำให้สามารถเขียนได้ดังนี้

นั่นคือ 
$$d\lambda = \frac{\partial \lambda(i, x)}{\partial i} di + \frac{\partial \lambda(i, x)}{\partial x} dx \quad (2-26)$$

ซึ่งการเคลื่อนที่  $dx$  มีค่าเป็นศูนย์ ตามข้อกำหนดในการหาพลังงานสะสม ในสนามเชื่อมโยง ดังนั้นเมื่อแทนสมการ (1-26) ลงใน (1-21) จะได้

$$\begin{aligned} W_f(i, x) &= \int i \frac{\partial \lambda(i, x)}{\partial i} di \\ &= \int_0^i \xi \frac{\partial \lambda(\xi, x)}{\partial \xi} d\xi \end{aligned} \quad (2-27)$$

โดยที่  $\xi$  เป็นตัวแปรของการอินทิเกรต

สมการ (2-27) คือ ค่าพลังงานสะสมในสนามเชื่อมโยงของระบบไฟฟ้า-กล ซึ่งมีการป้อนพลังงานจากแหล่งเดียว (Single excited system) ในที่นี้คือจากแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า (ดูรูป 2-2) co-energy,  $W_c$  ในเทอมของ  $i$  และ  $x$  สามารถถูกคำนวณได้จากสมการ (2-22)

$$\begin{aligned} W_c(i, x) &= \int \lambda(i, x) di \\ &= \int \lambda(\xi, x) d\xi \end{aligned} \quad (2-28)$$

หรือจากการกำหนดให้  $\lambda$  และ  $x$  เป็นตัวแปรอิสระต่อกัน ซึ่งจะได้

$$w_r = w_r(\lambda, x) \quad (2-29)$$

$$i = i(\lambda, x) \quad (2-30)$$

จากสมการ (2-21) จะได้พลังงานสะสมในสนามแม่เหล็ก,  $w_r$  ดังนี้

$$\begin{aligned} w_r(\lambda, x) &= \int i(\lambda, x) d\lambda \\ &= \int_0^\lambda i(\xi, x) d\xi \end{aligned} \quad (2-31)$$

จากสมการ (2-30)

$$di = \frac{\partial i(\lambda, x)}{\partial \lambda} d\lambda + \frac{\partial i(\lambda, x)}{\partial x} dx \quad (2-32)$$

ซึ่ง  $dx = 0$  ดังนั้นค่า co-energy,  $w_c$  คือ

$$\begin{aligned} w_c(\lambda, x) &= \int \lambda \frac{\partial i(\lambda, x)}{\partial \lambda} d\lambda \\ &= \int_0^\lambda \xi \frac{\partial i(\lambda, x)}{\partial \xi} d\xi \end{aligned} \quad (2-33)$$

จากสมการ (2-26) ซึ่ง  $dx = 0$  จะได้

$$d\lambda = L(x) di \quad (2-34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการ (2-81) ลงใน (2-27)

$$\begin{aligned} W_f(i, x) &= \int_0^i \xi L(x) d\xi \\ &= \frac{1}{2} L(x) i^2 \end{aligned} \quad (2-35)$$

ในทำนองเดียวกันในกรณีที่ระบบแม่เหล็กไฟฟ้ามีลักษณะเป็นเชิงเส้นจะได้  $W_f(\lambda, x)$ ,  $W_c(i, x)$ ,  $W_c(\lambda, x)$  มีค่าเท่ากับสมการ (2-35)

พลังงานในสนามเชื่อมโยงมีลักษณะเป็น สเตตฟังก์ชัน(State function)และอยู่ในเทอมตัวแปรของระบบ เช่น  $W_f$  ในสมการ (2-35) อยู่ในเทอมของ  $L(x)$  และ  $i$  ซึ่งเป็นตัวแปรของระบบ และสมการนี้เป็นจริงเสมอ โดยไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรนั้น การที่กำหนดให้ระบบไม่มีการเคลื่อนที่นั้น เป็นการทำให้วิธีคำนวณพลังงานสะสมในสนามง่ายขึ้น และไม่ทำให้ผลที่ได้ถูกจำกัดความถูกต้องแต่อย่างใด

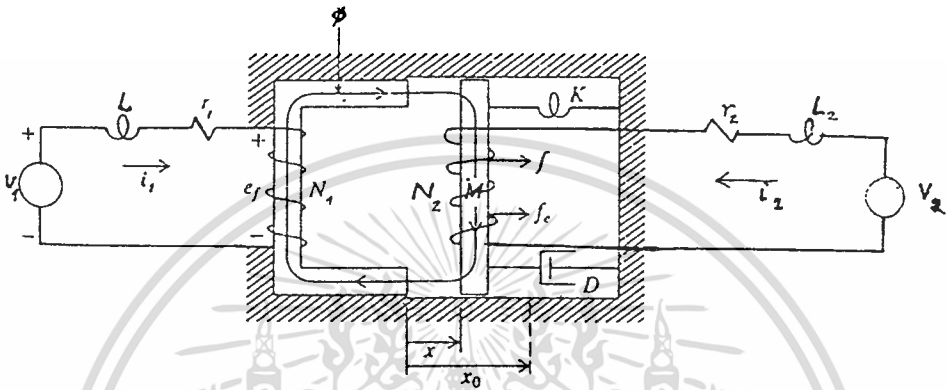
ในกรณีที่ระบบแม่เหล็กไฟฟ้าและระบบกลมากกว่า 1 (ซึ่งเรียกว่า Multiexcitedelectromagnetic systems) ก็สามารถคำนวณหาพลังงานสะสมในสนามเชื่อมโยงได้จากสมการ (2-19)

$$W_f = \int \sum_{j=1}^J i_j d\lambda_j \quad (2-36)$$

โดยกำหนดให้  $dx = 0$  ในสมการ (2-36)

เนื่องจากการที่สนามเชื่อมโยงมีลักษณะเป็น คอนเซอเวทิฟ ดังนั้นสามารถคำนวณพลังงานสะสม  $W_f$  ในสมการ (2-36) ได้ โดยกำหนดให้กระแสแต่ละค่ามีค่าสุดท้าย (final state) ในขณะที่กระแสอื่นๆ ถูกกำหนดให้ในทางคณิตศาสตร์มีค่า ค่าหนึ่ง ซึ่งอาจจะเป็นค่าสุดท้าย หรือเป็นศูนย์ก็ได้ ตัวอย่างเช่นในการคำนวณพลังงานสะสม,  $W_f$  ในกรณีที่ระบบไฟฟ้า 2 แหล่ง ( $J=2$ ) และจากระบบกล 1 แหล่ง ( $K=1$ )

ระบบเช่นนี้อาจมีลักษณะดังรูปที่ 2-7



รูปที่ 2-7 แสดงระบบไฟฟ้า-กล ซึ่งได้รับพลังงานจาก 2 ระบบไฟฟ้า และจาก 1 ระบบกล

โดยกำหนดให้  $dx = 0$ , กระแส  $i_1, i_2$  และการเคลื่อนที่  $x$  เป็นตัวแปรอิสระ จากสมการ (2-36) จะได้

$$W_F(i_1, i_2, x) = \int [i_1 d\lambda_1(i_1, i_2, x) + i_2 d\lambda_2(i_1, i_2, x)] \quad (2-37)$$

$$W_F(i_1, i_2, x) = \int i_1 \left[ \frac{\partial \lambda_1(i_1, i_2, x)}{\partial i_1} di_1 + \frac{\partial \lambda_1(i_1, i_2, x)}{\partial i_2} di_2 \right] \\ + i_2 \left[ \frac{\partial \lambda_2(i_1, i_2, x)}{\partial i_1} di_1 + \frac{\partial \lambda_2(i_1, i_2, x)}{\partial i_2} di_2 \right] \quad (2-38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การคำนวณสมการ (2-38) ทำได้โดย ขั้นตอนที่ 1 : กำหนดให้  $i_1$  มีการเปลี่ยนแปลงจนถึงค่าสุดท้ายที่ต้องการ ในขณะที่กำหนดให้  $i_2$  เป็น 0 นั่นคือ  $di_2 = 0$  และขั้นตอนที่ 2 : กำหนดให้  $i_2$  มีการเปลี่ยนแปลงจนถึงค่าที่ต้องการ ในขณะที่  $i_1$  คงที่อยู่ที่ค่าสุดท้ายตามขั้นตอนที่ 1 นั่นคือ  $di_1 = 0$  ซึ่งพลังงาน

สะสมในสนาม ,  $W_f$  จะมีค่าเท่ากับผลรวมจากการคำนวณในขั้นตอนที่ 1 กับที่ 2 นั่นคือ

$$W_f(i_1, i_2, x) = \int_{i_1} \frac{\partial \lambda_1(i_1, i_2, x)}{\partial i_1} di_1 + \int \left[ i_1 \frac{\partial \lambda_1(i_1, i_2, x)}{\partial i_2} di_2 + i_2 \frac{\partial \lambda_2(i_1, i_2, x)}{\partial i_2} \right] \quad (2-39)$$

ซึ่งเทอมแรกในสมการ (2-39) ได้จากการคำนวณในขั้นตอนที่ 1 และเทอมที่ 2 , 3 ได้จากการคำนวณในขั้นตอนที่ 2 หรือ

$$W_f(i_1, i_2, x) = \int_0^{i_1} \xi \frac{\partial \lambda_1(\xi, i_2, x)}{\partial \xi} d\xi + \int_0^{i_2} \left[ i_1 \frac{\partial \lambda_1(i_1, \xi, x)}{\partial \xi} d\xi + \xi \frac{\partial \lambda_2(i_1, \xi, x)}{\partial \xi} d\xi \right] \quad (2-40)$$

ตัวอย่างต่อไปนี้จะเป็นการคำนวณหาพลังงานสะสมในสนาม,  $W_f$  ในระบบที่แสดงในรูปที่ 2-7 โดยที่ระบบแม่เหล็ก (แกนเหล็ก) มีลักษณะเชิงเส้น โดยกำหนดให้

$$\lambda_1(i_1, i_2, x) = L_{11}(x)i_1 + L_{22}(x)i_2 \quad (2-41)$$

$$\lambda_2(i_1, i_2, x) = L_{21}(x)i_1 + L_{22}(x)i_2 \quad (2-42)$$

การเคลื่อนที่ทางกลมีค่าคงที่,  $dx = 0$  ดังนั้น

$$d\lambda_1(i_1, i_2, x) = L_{11}(x)di_1 + L_{12}(x)di_2 \quad (2-43)$$

$$d\lambda_2(i_1, i_2, x) = L_{12}(x)di_1 + L_{22}(x)di_2 \quad (2-44)$$

ซึ่ง  $L_{11}(x)$  เป็น partial derivative ของ  $\lambda_1(i_1, i_2, x)$  เทียบกับ  $i_1$

$L_{12}(x)$  เป็น partial derivative ของ  $\lambda_1(i_1, i_2, x)$  เทียบกับ  $i_2$

$L_{22}(x)$  เป็น partial derivative ของ  $\lambda_2(i_1, i_2, x)$  เทียบกับ  $i_2$

เมื่อแทนค่าลงในสมการ (2-40) จะได้

$$W_r(i_1, i_2, x) = \int_0^{i_1} \xi L_{11}(x) d\xi + \int_0^{i_2} [i_1 L_{12}(x) + \xi L_{22}(x)] d\xi \quad (2-45)$$

$$\text{หรือ } W_r(i_1, i_2, x) = \frac{1}{2} L_{11}(x) i_1^2 + L_{12}(x) i_1 i_2 + \frac{1}{2} L_{22}(x) i_2^2 \quad (2-46)$$

ดังนั้น สำหรับระบบไฟฟ้า-กล ที่มีระบบแม่เหล็กลักษณะเชิงเส้น และได้รับพลังงานจาก J-ระบบไฟฟ้า จะมีพลังงานสะสมในสนามเชื่อมโยง,  $W_r$  ดังนี้

$$W_r(i_1, i_2 \dots i_j, x) = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^J \sum_{q=1}^J L_{pq} i_p i_q \quad (2-47)$$

## 2-1-4 แรงซึ่งเกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และ สนามไฟฟ้าสถิต

จากสมการ (2-20) และ (2-21) จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\sum_{k=1}^K f_{ek} dx_k = \sum_{j=1}^J e_{ej} i_j dt - dW_f \quad (2-48)$$

ค่าของ  $W_f$  จากสมการ (2-22) เป็นค่าพลังงานที่ได้มาจากการกำหนดให้การเคลื่อนที่ในระบบกลองที่ ( $dx = 0$ ) ดังนั้นจึงไม่สามารถนำลงมาแทนในสมการ (2-48) เพื่อคำนวณหาค่า  $f_{ek}$  ได้

การคำนวณแรง หรือ แรงบิดในระบบไฟฟ้า-กลสามารถทำได้โดยใช้สมการ (2-48) ซึ่งต่อไปนี้จะเป็นการแสดงวิธีการคำนวณแรงที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า-กล ที่ได้รับพลังงานจากระบบไฟฟ้าจำนวน  $J$  และจากระบบกลจำนวน  $K$

อาจเขียนสมการ (2-48) ได้ดังนี้

$$\sum_{k=1}^K f_{ek} dx_k = \sum_{j=1}^J i_j d\lambda_j - dW_f \quad (2-49)$$

และกำหนดให้  $i_j$  และ  $x_k$  เป็นตัวแปรอิสระ ดังนั้น

$$W_f = W_f(i_1, \dots, i_J; x_1, \dots, x_K) \quad (2-50)$$

$$\lambda_r = \lambda_r(i_1, \dots, i_J; x_1, \dots, x_K) \quad (2-51)$$

ซึ่งจะได้

$$dW_f = \sum_{j=1}^J \frac{\partial W_f(i_j, x_k)}{\partial i_j} di_j + \sum_{k=1}^K \frac{\partial W_f(i_j, x_k)}{\partial x_k} dx_k \quad (2-52)$$

และ

$$d\lambda_j = \sum_{n=1}^J \frac{\partial \lambda_j(i_j, x_k)}{\partial i_n} di_n + \sum_{k=1}^K \frac{\partial \lambda_j(i_j, x_k)}{\partial x_k} dx_k \quad (2-53)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้  $\partial/\partial i_n$  เพื่อการศึกษาเท่านั้น  $\partial/\partial x_k$  ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการ (2-51) และ (2-52) ลงในสมการ (2-49) และเทียบสัมประสิทธิ์ จะได้

$$f_{ok}(i_j, x_k) = \sum_{j=1}^J i_j \frac{\partial \lambda_j(i_j, x_k)}{\partial x_k} - \frac{\partial w_r(i_j, x_k)}{\partial x_k} \quad (2-54)$$

และ

$$0 = \sum_{j=1}^J \left[ \sum_{n=1}^J i_j \frac{\partial \lambda_j(i_j, x_k)}{\partial i_n} di_n - \frac{\partial w_r(i_j, x_k)}{\partial i_j} di_j \right] \quad (2-55)$$

ซึ่งสมการ (2-54) ไม่มีความสำคัญทางปฏิบัติ

นอกจากนั้น อาจจะสามารถได้จาก co-energy ดังต่อไปนี้

จาก 
$$w_c = \sum_{j=1}^J i_j \lambda_j - w_r \quad (2-56)$$

ดังนั้น

$$\frac{\partial w_c(i_j, x_k)}{\partial x_k} = \sum_{j=1}^J i_j \frac{\partial \lambda_j(i_j, x_k)}{\partial x_k} - \frac{\partial w_r(i_j, x_k)}{\partial x_k} \quad (2-57)$$

เมื่อแทนสมการ (2-57) ลงใน (2-53) จะได้

$$f_{ek}(i_j, x_k) = \frac{\partial w_c(i_j, x_k)}{\partial x_k} \quad (2-58)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงในสมการ (2-53) หรือ(2-58) คือแรงที่เกิดขึ้นที่ระบบกล ลำดับที่  $k$

ในกรณีที่ระบบกลมีการเคลื่อนที่แบบหมุน ก็ต้องแทน  $f_{ek}$  ด้วยแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า,  $T_{ek}$  และแทนการเคลื่อนที่,  $x_k$  ด้วยการเคลื่อนที่เชิงมุม,  $\theta_k$  ทั้งนี้เพราะการเปลี่ยนแปลงพลังงานกลในระบบหมุน (rotational system) คือ

$$dW_{mk} = -T_{ek} d\theta_k \quad (2-59)$$

การคำนวณค่าแรงบิดที่เกิดเนื่องจากสนามเชื่อมโยงซึ่งเป็นสนามไฟฟ้า (เช่นระบบในรูปที่ 2-5) ก็สามารทำได้โดยวิธีการเดียวกันกับการหาค่าแรงที่เกิดเนื่องจากสนามเชื่อมโยงที่เป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเช่นที่ผ่านมา ซึ่งจะได้

$$f_{ek}(e_{fj}, x_k) = \sum_{j=1}^J \left[ e_{fj} \frac{\partial q_i(e_{fj}, x_k)}{\partial x_k} \right] - \frac{\partial W_f(e_{fj}, x_k)}{\partial x_k} \quad (2-60)$$

หรือ

$$f_{ek}(e_{fj}, x_k) = \frac{\partial W_c(e_{fj}, x_k)}{\partial x_k} \quad (2-61)$$

โดยจะไม่แสดงวิธีการคำนวณไว้ในที่นี้

ถ้าสมมติให้ระบบแม่เหล็กมีลักษณะเชิงเส้น จะได้เทอม  $(i, x)$  ตามสมการ  $\lambda(i, x) = L(x)i$  และพลังงานสะสม  $W_f(i, x)$  จะมีค่าตามสมการ (2-35) และจะมีค่าเท่ากับ co-energy,  $W_c$  จากสมการที่ (2-53) หรือ (2-58) โดยที่กำหนดให้  $J = 1, K = 1$  (ระบบไฟฟ้า-กลที่ได้รับพลังงานจาก 1-ระบบไฟฟ้า, 1-ระบบกล, ดังเช่นระบบในรูปที่ 2-4) จะได้

$$f_{ek}(i, x) = \frac{\partial W_c(i, x)}{\partial x}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน =  $\frac{1}{2} i^2 \frac{dL(x)}{dx}$  นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่น การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ (2-62)

ซึ่งตามข้อกำหนด แรง  $f_c$  มีค่าเป็นบวก ถ้าอยู่ในทิศทางเดียวกับการเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนที่  $x$  จากสมการ (2-15)

$$dW_m = -f_c dx \quad (2-63)$$

จะเห็นได้ว่า สนามเชื่อมโยงจะได้รับพลังงานจากระบบกล เมื่อ  $f_c$  และ  $dx$  มีเครื่องหมายตรงข้ามกัน และสนามเชื่อมโยงจะถ่ายพลังงานให้ระบบกล เมื่อ  $f_c$  และ  $dx$  มีเครื่องหมายเหมือนกัน

สมการ (2-62) แสดงให้เห็นว่าแรงแม่เหล็กไฟฟ้า  $f_c$  ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า-กล นั้นมีขนาดและทิศทางตามอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าอินดักแตนซ์  $L(x)$  เมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่  $x$ ,  $dL(x)/dx$  ซึ่งทำให้สมการที่ใช้อธิบายเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ มีสัมประสิทธิ์แปรตามเวลา และเป็นสมการไม่เชิงเส้น (Time-varying coefficient, non-linear equation)

## 2-2 ทฤษฎีพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

### 2-2-1 การทำงาน

เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะเป็นอุปกรณ์ที่เราจ่ายกระแสสลับเข้าไปที่ สเตเตอร์(Stator) โดยตรงแล้วจ่ายผ่านไปยัง โรเตอร์(Rotor) โดยการเหนี่ยวนำ(Induce) หรือ transformer action จาก สเตเตอร์ ตัวขดลวดของ สเตเตอร์ ที่เรียกว่าขดลวด สเตเตอร์ จะมีลักษณะการพันเหมือนกับ ชิงโคร นัส แม่ขึ้นแล้วเมื่อมีการกระตุ้นจากกระแสที่สมมาตรทั้งวเฟสจะสร้างสนามแม่เหล็กหมุนใน ช่อง อากาศ ด้วยความเร็ว ชิงโครนัส ที่ถูกกำหนดโดยจำนวนขั้วแม่เหล็กและความถี่กระแสไฟฟ้าที่ สเต เตอร์ จากสมการ (2-64)

$$n = \frac{120 f}{p} \quad (2-64)$$

โรเตอร์ โดยทั่วไปจะมีลักษณะแบบใดแบบหนึ่งในสองแบบนี้

1. วาวด์ โรเตอร์(Wound rotor) จะมีการพันขดลวดหลายเฟสเหมือนกับใน สเตเตอร์ โดย ที่ขดลวดสามารถต่อออกมาภายนอกเพื่อควบคุมได้โดยผ่าน วงแหวนลื่น และ แปรง ถ่าน
2. สไควเรลเคจ โรเตอร์(Squirrel cage rotor) คือ โรเตอร์ แบบกรงกระรอกทำจากแท่งตัว นำที่ฝังอยู่ในผิวของโรเตอร์ และถูกลัดวงจรเข้าด้วยกันด้วยวงแหวนลัดวงจร ความง่าย และความแข็งแรงอย่างยิ่งของโครงสร้างของตัวโรเตอร์คือข้อดีอันยอดเยี่ยมของมัน

สมมติให้ โรเตอร์ หมุนด้วยความเร็วคงที่ค่าหนึ่งที่น้อยกว่าความเร็วชิงโครนัส ค่า เปอรูนิตสลลิป (per unit slips) คือ

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (2-65)$$

โดยที่  $n_1$  = ความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนตามสมการ (2-64)

ในส่วนของ โรเตอร์ การเคลื่อนที่สัมผัสของสเตเตอร์ฟลักส์และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในตัวนำของ โรเตอร์ จะอยู่ในรูป ความถี่สลิป(Slip frequency)sf เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีคุณสมบัติ การทำงานคล้ายหม้อแปลงแต่จะรวมคุณสมบัติการแปลงความถี่เข้าไปด้วยทำให้เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ วาวด์ โรเตอร์ จะใช้เป็นอุปกรณ์แปลงความถี่ได้ กระแสไฟฟ้าใน โรเตอร์ ขึ้นอยู่กับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและโรเตอร์อิมพีแดนซ์ ที่ความถี่สลิปเท่านั้นขณะเริ่มหมุน โรเตอร์ จะอยู่กับที่สลิป(slip) จะเท่ากับ 1 และความถี่ที่ โรเตอร์ จะเท่ากับ สเตเตอร์ สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสโรเตอร์จะหมุนไปด้วยความเร็วเท่ากับสเตเตอร์ฟิลด์และแรงบิดเริ่มต้นที่ได้จะหมุน โรเตอร์ ไปในทิศทางการหมุนของสนามแม่เหล็กหมุนในช่องอากาศ ความจริงข้อหนึ่งของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำคือ ความเร็วขณะทำงานของโรเตอร์ จะไม่มีทางเท่ากับความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน เนื่องจาก ในขณะที่ โรเตอร์ มีความเร็วเท่ากับสนามแม่เหล็กหมุนตัวนำใน โรเตอร์ จะอยู่นิ่งเมื่อเทียบกับสนามแม่เหล็กหมุนทำให้เกิดการตัดของเส้นแรงแม่เหล็กกับแท่งตัวนำ จึงทำให้ไม่เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ขึ้นในตัวนำใน โรเตอร์ กระแสใน โรเตอร์ จึงไม่มี ทำให้สนามแม่เหล็กในส่วนที่จะเกิดในโรเตอร์จะไม่มีใน สภาวะอย่างนี้เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะไม่สามารถทำงานได้ ทิศทางการหมุนของ โรเตอร์ จะหมุนในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุนในช่องอากาศ ความถี่ของกระแสในโรเตอร์ คือ sf และสนามแม่เหล็กของ โรเตอร์ จะเกิดจากกระแสส่วนนี้ มันจะเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็ว  $sn_1$  r/min เมื่อเทียบกับ โรเตอร์ แต่มันจะต้องรวมกับการหมุนทางกลของ โรเตอร์ ที่  $n$  r/min โดยที่ความเร็วของสนามแม่เหล็กของ โรเตอร์ ในช่องอากาศจะเป็นผลรวมของความเร็วของทั้งสองส่วนนี้จะเท่ากับ

$$sn_1 + n = sn_1 + n_1(1-s) = n_1 \quad (2-66)$$

เมื่อเปรียบเทียบกันแล้วสนามแม่เหล็กของ โรเตอร์ กับของ สเตเตอร์ จะเสมือนว่าอยู่หนึ่ง กล่าวคือสนามแม่เหล็กทั้งสองจะวิ่งเกาะกันไปในตอนนี้จะเกิดแรงบิดคงตัวขึ้น ซึ่งเรียกว่า แรงบิด อซิงโครนัส รูปที่ 2-9 แสดง กราฟ แรงบิด - ความเร็ว ของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก องค์ประกอบที่ทำให้เกิดแรงบิดนี้หาได้ดังนี้

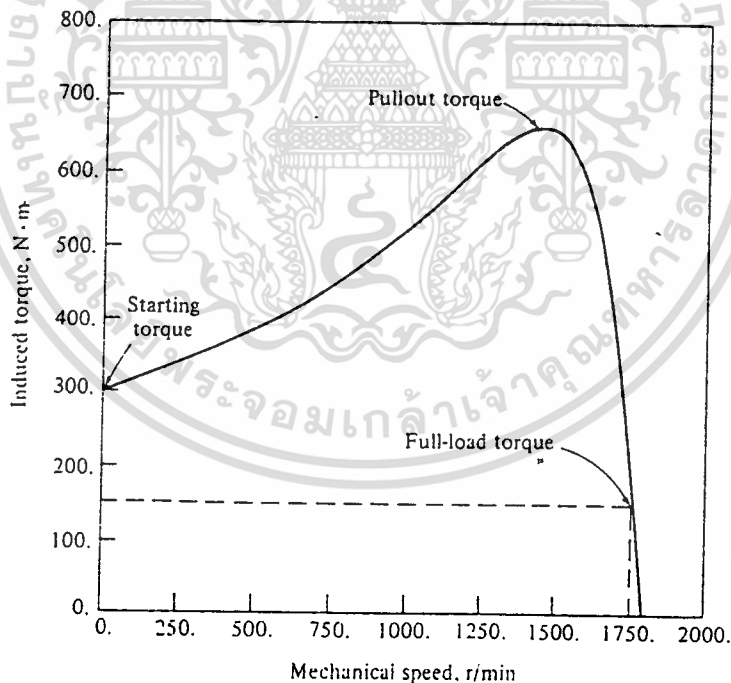
$$T = -\frac{\pi}{2} \left( \frac{P}{2} \right)^2 \varphi_{sr} F_r \sin \delta_r \quad (2-67)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในของกรมศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $\Phi_r$  คือ เส้นแรงแม่เหล็กลัพธ์ที่เป็นผลมาจากการรวมกันของ สเตเตอร์และโรเตอร์ ในสมการนี้จะประมาณได้ว่าคงที่เมื่อ แรงดันไฟฟ้าและความถี่ที่สเตเตอร์คงที่ถ้า mmf ของ โรเตอร์แปรผันตรงกับกระแสโรเตอร์  $I_r$  สมการที่ (2-67) จะเขียนได้ดังนี้

$$T = K I_r \sin \delta_r \quad (2-68)$$

เมื่อ  $K$  เป็นค่าคงที่ กระแสโรเตอร์จะถูกกำหนดโดย (Electromotive force) emf ในโรเตอร์และ ลีเกจ อิมพีแดนซ์ (Leakage impedance) ณ ที่ความถี่สลิป emf ในโรเตอร์จะแปรผันตรงกับสลิป



รูปที่ 2-8 แสดงกราฟ แรงบิด - ความเร็วของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ความถี่ที่โรเตอร์จะมีค่าน้อยมาก จากเหตุผลที่การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของโรเตอร์กับสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์มีค่าน้อยขณะโรเตอร์อยู่ในภาวะไร้โหลด จากเหตุผลนี้ทำให้อิมพีแดนซ์ในโรเตอร์จะมีองค์ประกอบของค่าความต้านทานที่มีค่ามากกว่าค่ารีแอคแตนซ์ ในตอนนี้กระแสโรเตอร์จะแปรผันตรงกับ emf และจะ อินเฟสกับ emf อีกด้วย ซึ่งตัว emf นี้ก็ค่อนข้างจะแปรผันตรงกับสลิป

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยิ่งกว่านั้นคลื่น  $m_{mf}$  ของโรเตอร์จะล้าหลัง  $m_{mf}$  ลัพธ์อยู่ประมาณ  $90^\circ$  ไฟฟ้าทำให้ค่า  $\sin \delta$  มีค่าประมาณเท่ากับ 1 ความสัมพันธ์ของแรงบิดกับสลิปจะค่อนข้างเป็นเชิงเส้นที่ค่าสลิปมีค่าน้อยๆ

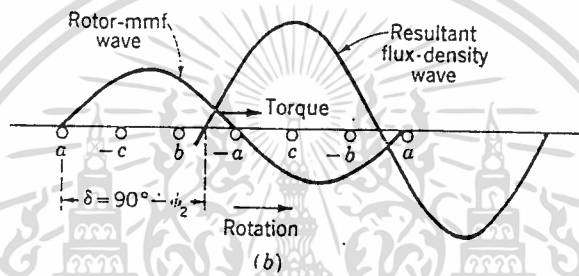
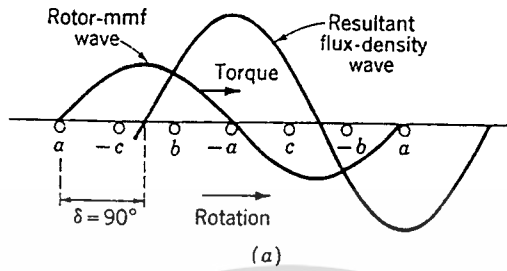
เมื่อสลิปเพิ่มขึ้นเนื่องจากจ่ายภาระ ให้กับเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีผลทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของโรเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากผลกระทบของลิกเกจรีแอคแตนซ์ที่มีค่ามากขึ้น มีผลทำให้กระแสโรเตอร์แปรผันกับสลิปได้น้อยลงและจะล้าหลัง  $e_{mf}$  มากขึ้นกว่าเดิมจากที่เคยอินเฟสและ  $m_{mf}$  ของโรเตอร์จะล้าหลัง  $m_{mf}$  ลัพธ์มากขึ้นแรงบิดจะเพิ่มขึ้นสลิปจะเพิ่มขึ้นด้วยและจะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่งแล้วจะลดลงเรียกว่า แรงบิดเบรคดาวน์ เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกจะให้ความแตกต่างของสลิปน้อยมากระหว่างภาวะภาระเต็มพิกัดกับภาวะไร้ภาระส่วนในวาล์วโรเตอร์ที่สามารถต่อวงจรภายในโรเตอร์ออกมาควบคุมได้ ทำให้เราสามารถควบคุมคุณสมบัติแรงบิดได้จากการควบคุมโรเตอร์อิมพีแดนซ์ทำให้เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบวาล์วโรเตอร์ จ่ายแรงบิดได้สูง

## 2-2-2 กระแสและ แฉ้นแรงแม่เหล็ก ในเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

รูปที่ 2-9 จะแสดงถึงเส้นแรงแม่เหล็กของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบวาล์วโรเตอร์ที่มี 2 ขั้ว 3 เฟสในรูปแสดงถึงคลื่นความหนาแน่นสนามแม่เหล็กที่กำลังเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วเชิงมุม  $\omega_s$  และที่มุมสลิปเท่ากับ  $S\omega_s$  เมื่อเทียบกับขดลวดโรเตอร์ที่ยังหมุนด้วยความเร็วทางกล  $(1-S)\omega_s$  ในรูปจะแสดงถึงตำแหน่งของ ค่าชั่วขณะของ  $e_{mf}$  ในตัวนำเฟส a

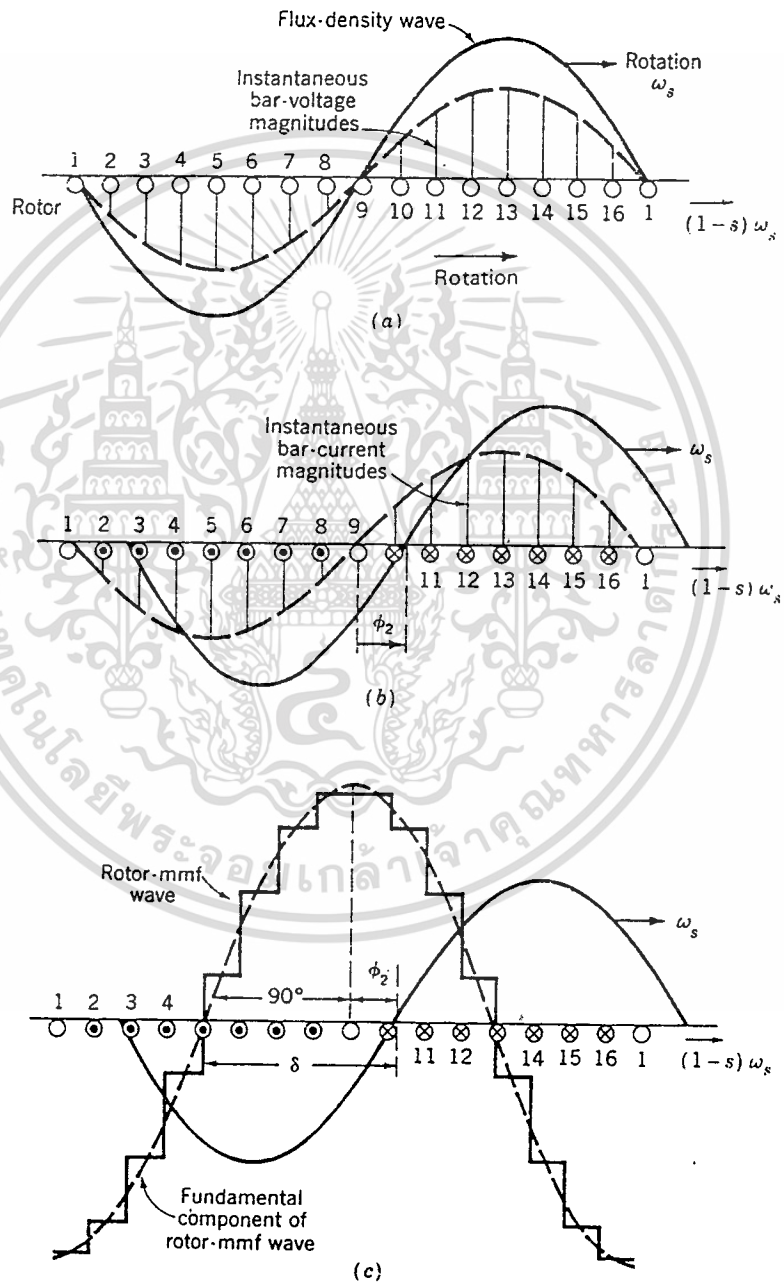
ที่ภาวะลิกเกจรีแอคแตนซ์เป็นศูนย์ (a) และไม่เป็นศูนย์ (b) ถ้าโรเตอร์ลิกเกจรีแอคแตนซ์เท่ากับ  $S\omega_s$  ควบกับโรเตอร์ลิกเกจอินดักแตนซ์ ขณะหยุดนิ่งจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความต้านทาน เมื่อเฟส a มีค่าสูงสุดคลื่นแม่เหล็กของโรเตอร์จะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ตรงกลางแกนเฟส a การจัดเชิงมุมจะเท่ากับ  $90^\circ$  ถ้าลิกเกจรีแอคแตนซ์มีค่าสูงขึ้นกระแสในเฟส a จะล้าหลัง  $e_{mf}$  ในโรเตอร์ด้วยเฟาเวอร์แฟคเตอร์  $\phi_2$  ของลิกเกจอิมพีแดนซ์กระแสในเฟส a และ  $m_{mf}$  จะยังไม่สูงสุดจนกว่าจะรวมมุม  $\phi_2$  เข้าไป กระแส  $I_a$  จะทำให้  $m_{mf}$  ล้าหลัง  $I_a$  ไปด้วยมุม  $\phi_2$  โดยทั่วไปมุมแรงบิดของมอเตอร์จะเป็นคังสมการนี้

$$\delta = 90^\circ + \phi_2 \quad (2-69)$$



รูปที่ 2-9 แสดงคลื่นแม่เหล็กในเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์ที่เคลื่อนที่สัมพันธ์กัน

ในรูปที่ 2-10 จะแสดงถึงคลื่นแม่เหล็กของโรเตอร์แบบกรงกระรอกตัวนำทั้ง 16 แห่งจะแทนขดลวดที่ให้สนามแม่เหล็ก 2 ขั้ว



### 2-2-3 วงจรสมมูลของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ[5]

เราจะสร้างแบบจำลองที่แทนคุณลักษณะของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในรูปของวงจรไฟฟ้าโดยอาศัยทฤษฎีพื้นฐานทางแม่เหล็กไฟฟ้าและวงจรไฟฟ้าสร้างขึ้นมา อันดับแรกเราพิจารณาที่ เส้นแรงแม่เหล็กหลักในช่องอากาศที่เกิดจากสเตเตอร์จะสร้าง emf ขึ้นในขดลวดสเตเตอร์เองก่อน ที่สุดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วจะมีความแตกต่างกับ emf ดังนี้

$$V_1 = E_1 + I_1(R_1 + jX_1) \quad (2-70)$$

เมื่อ  $V_1$  = ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของสเตเตอร์

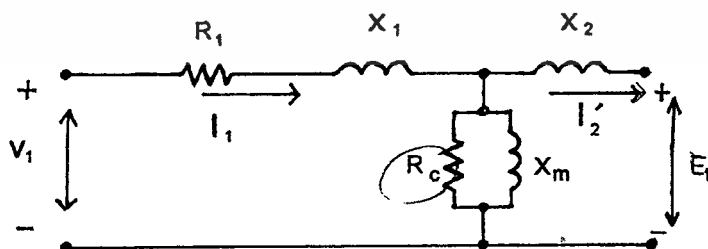
$E_1$  = แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจากเส้นแรงแม่เหล็กหลักในช่องอากาศ

$I_1$  = กระแสไฟฟ้าในสเตเตอร์

$R_1$  = ค่าความต้านทานขดลวดของสเตเตอร์

$X_1$  = สเตเตอร์ลิกเกจ รีแอคแตนซ์

รายละเอียดของวงจรอยู่ในรูปที่ 2-11



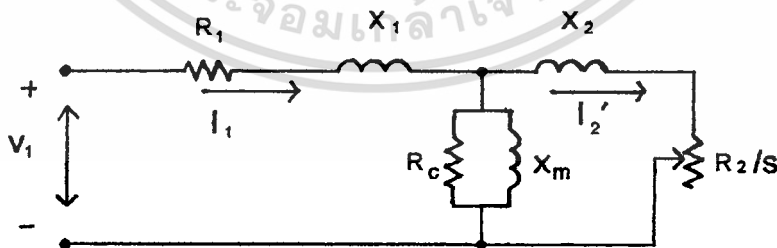
mmf ลัพธ์จะถูกสร้างขึ้นจากการรวมของจากการรวมระหว่าง mmf ของโรเตอร์กับของสเตเตอร์ เมื่อใช้การเปรียบเทียบกับหม้อแปลงแล้ว กระแสในสเตเตอร์จะแยกได้ 2 ส่วน คือ

1. ส่วนที่นำไปจ่ายโหลด  $I'_2$
2. ส่วนที่ทำหน้าที่เป็นกระแสกระตุ้น  $I_\phi$

ถ้าให้  $I_2$  แทนกระแสโรเตอร์,  $I'_2$  คือกระแสโรเตอร์ที่ส่งผ่านมาทางสเตเตอร์จะสร้าง mmf ที่จะต่อต้านกับ mmf ที่เกิดจาก  $I_2$

กระแสกระตุ้น  $I_\phi$  สามารถแยกออกได้เป็นสองส่วนคือ กระแสส่วนที่สูญเสียในแกนเหล็ก  $I_c$  ซึ่งจะมีเฟสเดียวกับ  $E_1$  แลกระแสส่วนสร้างแม่เหล็ก  $I_m$  ซึ่งจะล้าหลัง  $E_1$  เป็นมุม  $90^\circ$  ในวงจรสมมูล กระแสกระตุ้น  $I_\phi$  สามารถแสดงไว้ในส่วนวงจรขนานที่ประกอบด้วยความต้านทาน  $R_c$  และค่าแมกนีไทซิง รีแอกแตนซ์  $X_m$  เช่นที่แสดงในรูป 2-11

รูปแสดงวงจรสมมูลที่รวมมาไว้ทางสเตเตอร์ดังรูปที่ 2-12



#### 2-2-4 กำลังและแรงบิด

สมการแสดงแรงบิดที่ใช้อธิบายการทำงานของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถถูกพิสูจน์ได้จากวงจรสมมูลดังต่อไปนี้

กระแสอินพุทที่จ่ายให้แก่เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  $I_1$

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_{eq}} \quad (2-71)$$

โดยที่

$$Z_{eq} = R_1 + jX_1 + \frac{1}{G_c - jB_m + \frac{1}{R_2/s + jX_2}} \quad (2-72)$$

$$G_c = \frac{1}{R_c} \quad (2-73)$$

$$B_m = \frac{1}{X_m} \quad (2-74)$$

กำลังสูญเสียรวมทั้งหมด เนื่องจากความต้านทานในวงจร สเตเตอร์ทั้งสามเฟส,  $P_{cu,s}$

$$P_{cu,s} = 3I_1^2 R_1 \quad (2-75)$$

กำลังสูญเสียในแกน (รวม 3 เฟส),  $P_{core}$

$$P_{core} = 3 E_1^2 G_c = \frac{3 E_1^2}{R_c} \quad (2-76)$$

กำลังงานในช่องอากาศ,  $P_{ag}$

$$P_{ag} = P_{in} - P_{cu,r} - P_{core} \quad (2-77)$$

ซึ่งเมื่อพิจารณาเฉพาะวงจรสมมูลของโรเตอร์จะเห็นว่ามีความเฉพาะส่วนของ  $R_2/S$  นั้น ที่สามารถรับกำลังงานจากช่องอากาศได้ ดังนั้น

$$P_{ag} = 3 I_2^2 \frac{R_2}{S} \quad (2-78)$$

และกำลังงานสูญเสียเนื่องจากความต้านทานในวงจรโรเตอร์ (รวม 3 เฟส) คือ

$$P_{cu} = 3 I_2^2 R_2 \quad (2-79)$$

จะได้

$$P_{conv} = P_{ag} - P_{cu,r} \quad (2-80)$$

$$= 3 I_2^2 R_2 \left( \frac{1-s}{s} \right) \quad (2-81)$$

จากสมการ(2-78) และ (2-79) จะได้

$$P_{cu,r} = s P_{ag} \quad (2-82)$$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในขณะที่โรเตอร์หยุดนิ่ง,  $S = 1$  กำลังงานในช่องอากาศทั้งหมดจะถูกถ่ายเทให้โรเตอร์ เมื่อแทนสมการ(2-82)ลงใน(2-80)จะได้

$$P_{\text{conv}} = (1-S)P_{\text{ag}} \quad (2-83)$$

กำลังงานกลส่งออก,  $P_{\text{out}}$  คือ

$$P_{\text{out}} = P_{\text{conv}} - P_{\text{fw}} - P_{\text{stray}} \quad (2-84)$$

แรงบิดซึ่งเกิดจากการเหนี่ยวนำภายในเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ,  $T_{\text{ind}}$  มีค่าดังนี้

$$T_{\text{ind}} = \frac{P_{\text{conv}}}{\omega_m} \quad (2-85)$$

และ

$$T_{\text{ind}} = \frac{P_{\text{ag}}}{\omega_s} \quad (2-86)$$

จากสมการ(2-78),(2-79) และ (2-80) เราสามารถนำไปสู่วงจรสมมูลได้ดังรูป (2-12) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดได้เข้ามาใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

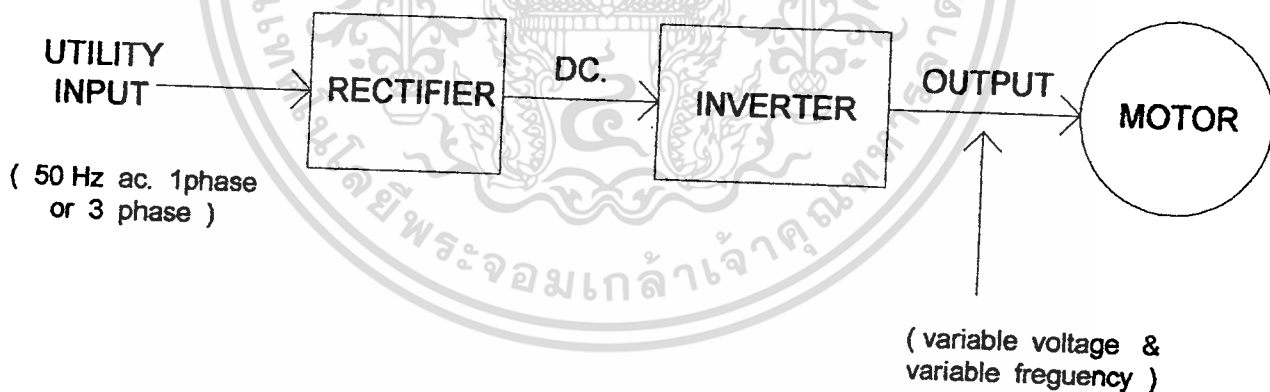
## บทที่ 3

## อินเวอร์เตอร์เพื่อการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ

## 3-1 บทนำ

อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะต้องสามารถเปลี่ยนแปลงแรงดันและความถี่ได้ซึ่งจะทำหน้าที่เชื่อมโยงระหว่างระบบจ่ายไฟ (Utility Power System) และมอเตอร์ ดังนั้นอินเวอร์เตอร์ที่ดีต้องมีคุณสมบัติพื้นฐานที่สอดคล้องกับความต้องการของมอเตอร์ดังต่อไปนี้

1. สามารถที่จะปรับความถี่ได้ เป็นสัดส่วนกับความเร็วรอบที่ต้องการ
2. สามารถปรับแรงดันเอาต์พุตเพื่อรักษาอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ ( $v/f$ ) ให้คงที่ตลอดช่วงแรงบิดคงที่ตามต้องการ
3. สามารถจ่ายกระแสได้เต็มพิกัดที่ความถี่ใด ๆ ซึ่งอยู่ในช่วงทอร์กคงที่ที่ต้องการ



รูปที่ 3-1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบอินเวอร์เตอร์เพื่อการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในรูปที่ 3-1 แสดงหลักการพื้นฐานซึ่งแหล่งจ่ายไฟเข้า เอชี่ จะถูกเปลี่ยนเป็นแรงดันดีซีโดยใช้เรกติไฟเออร์ที่สามารถควบคุมแรงดันได้ หรือควบคุมไม่ได้ก็ได้ (Controlled or Uncontrolled rectifier) และอินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันไฟ ดีซี ให้เป็น เอชี่ ที่สามารถเปลี่ยนแรงดันและความถี่ได้ โดยทั่วไประบบอินเวอร์เตอร์สามารถจำแนกออกตามชนิดของอินเวอร์เตอร์ได้เป็น 2 แบบใหญ่ ๆ คือ

1. อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดัน (Voltage – Source Inverter) : VSI นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
2. อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกระแส (Current – Source Inverter) : CSI ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้แบบอื่น ๆ อีกมากมาย

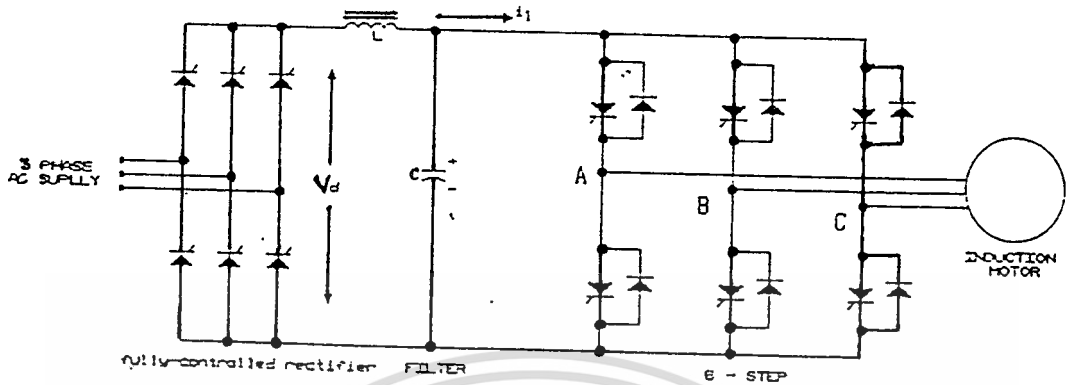
โดยอินเวอร์เตอร์ทั้งสองแบบนี้จะให้คุณสมบัติ และลักษณะของรูปคลื่นของแรงดัน และ กระแสที่แตกต่างกัน และเหมาะสมกับการใช้งานที่แตกต่างกันออกไปด้วย

### 3-2 Voltage Source Inverter Drives.

โครงสร้างแรงดันดิซิชัลกึ่งมีขนาด คาปาซิเตอร์ฟิลเตอร์ (capacitor filter) ที่มีค่ามาก อาจกล่าวได้ว่าแรงดันอินพุตของอินเวอร์เตอร์มีค่าคงที่ ทำให้แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์คงที่ ไม่ขึ้นอยู่กับการโหลด และโดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็นสองชนิดด้วยกันคือ 6-step อินเวอร์เตอร์ และ PWM อินเวอร์เตอร์ ข้อดีของโวลต์เดจเซอร์อินเวอร์เตอร์สามารถควบคุมแรงดันและความถี่ได้ง่าย ปรับความถี่ได้ย่านกว้างและใช้ได้กับมอเตอร์หลาย ๆ ตัวที่ทำงานพร้อม ๆ กัน ส่วนข้อเสียมักมีปัญหาในเรื่อง ลัดวงจร (shoot through) ของอุปกรณ์สวิตชิ่งภายในกิ่งเดียวกันของอินเวอร์เตอร์ ในทางปฏิบัติใช้ วงจรลอคเอาต์ที่มีการสร้างเดดไทม์ (dead time) เป็นส่วนช่วยในการป้องกัน

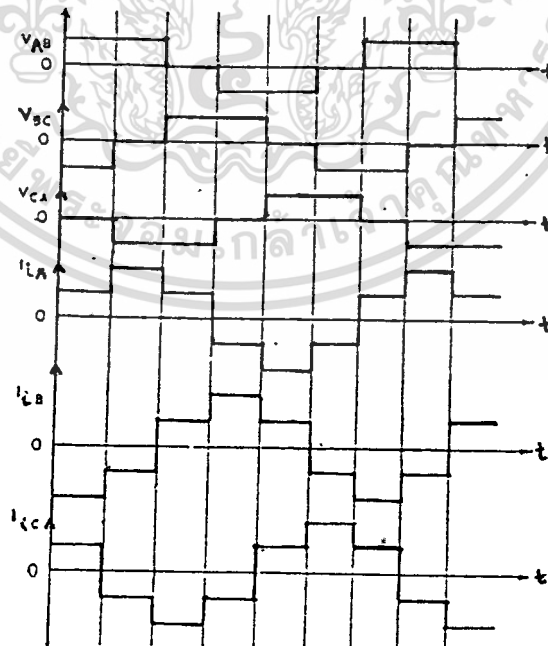
#### 6 - step อินเวอร์เตอร์

6 - step อินเวอร์เตอร์สามารถควบคุมจ่ายแรงดันเอาต์พุตที่ปรับเปลี่ยนความถี่ได้ จากรูปที่ 3.2 (a) จะมีการควบคุมแรงดันเอาต์พุตที่ส่วนของดิซิชัลกึ่งซึ่งใช้ fully-controlled rectifier และจะมีการควบคุมความถี่ของเอาต์พุตที่อินเวอร์เตอร์ แรงดันไลน์ทางด้านเอาต์พุตที่ได้จะมีรูปร่างเป็นคลื่น กึ่งสแควร์ (quasi-square) ส่วนแรงดันเฟสจะมีรูปคลื่นเป็น 6-step ดังแสดงในรูปที่ 3.2 (b) อุปกรณ์สวิตชิ่งแต่ละตัวในอินเวอร์เตอร์จะมีการสวิตช์เพียง 2 ครั้งในหนึ่งคาบความถี่ของแรงดัน มूलฐานและเนื่องจากต้องมีการควบคุมแรงดันดิซิชัลกึ่งโดยใช้เร็คติไฟเออร์ ที่มีไทรสเตอร์เป็น อุปกรณ์ตัดต่อโซลิดสเตต โดยการควบคุมแรงดันดิซิชัลกึ่งโดยใช้เร็คติไฟเออร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ตัดต่อโซลิดสเตต โดยการควบคุมเฟสทำให้เพาเวอร์แฟกเตอร์ทางด้านอินพุตมีค่าต่ำซึ่งเป็นข้อเสีย เราสามารถแก้ไขได้โดยเปลี่ยนมาใช้ dc/dc คอนเวอร์เตอร์ที่เป็นชอปเปอร์ควบคุม ทำให้ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ดีขึ้นได้



รูปที่ 3-2 (a) แสดงวงจรกำลังของ 6-step อินเวอร์เตอร์

โดยปกติ Voltage fed drives ชนิด 6-step นี้ใช้กับมอเตอร์ขนาดกำลังต่ำไปจนถึงขนาดปานกลางและจะใช้ได้ดีในช่วงควมถี่ของอินเวอร์เตอร์สูงจะไม่มีปัญหาของการสูญเสียเนื่องจากการสับสวิตช์ (switching loss) แต่อย่างไรก็ตามลักษณะการควบคุมเพื่อที่จะให้  $v/f$  คงที่ที่จะต้องควบคุมวงจรกำลัง 2 ส่วน คือในส่วนของดีซีลิงก์ และอินเวอร์เตอร์ทำให้ระบบซับซ้อนและยุ่งยากทำให้เสถียรภาพของระบบต่ำลง



รูปที่ 3-2 (b) แสดงรูปคลื่นทางด้านเอาต์พุตของ 6-step อินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### -PWM อินเวอร์เตอร์

โครงสร้างของ PWM อินเวอร์เตอร์ในส่วนของแรงดันคิซีลิ่งสามารถใช้เรกติไฟเออร์ที่เป็นไดโอด ทำให้แรงดันของคิซีลิ่งมีค่าคงที่ซึ่งไม่สามารถควบคุมแรงดันคิซีลิ่งได้ ทำให้ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ทางด้านอินพุตดีขึ้นและลดขนาด LC ฟิลเตอร์ให้เล็กลง ดังนั้นความถี่และแรงดันเอาต์พุตของแรงดันมูลฐานสามารถควบคุมโดยใช้เทคนิคของ PWM ซึ่งอยู่ในส่วนของอินเวอร์เตอร์ เทคนิค PWM นี้จะให้แรงดันเอาต์พุตที่มีองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์อันดับค่าน้อยลงแต่จำนวนครั้งของการสวิตช์สูงขึ้น ดังนั้นจึงมีปัญหาคาการกระเพื่อมของแรงบิดสำหรับเทคนิคของการสร้างแพทเทิร์นการสวิตช์ของ PWM จะได้กล่าวอย่างละเอียดในหัวข้อ 3-4

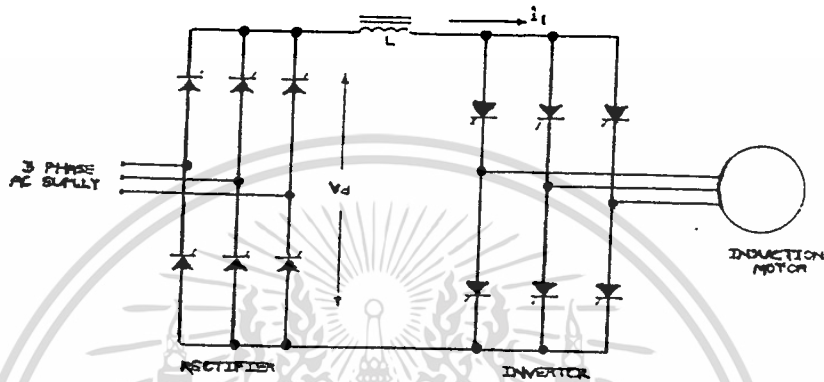
ถึงแม้ว่า PWM อินเวอร์เตอร์ลดการสูญเสียของมอเตอร์เนื่องจากผลของฮาร์โมนิกส์ก็ตาม แต่ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ค่อนข้างจะต่ำลง เพราะผลของจำนวนสวิตช์สูงขึ้น ดังนั้นในการออกแบบที่ดีควรคำนึงถึงความถี่การสวิตช์ควรเพิ่มขึ้นในค่าที่ยอมรับได้ของอุปกรณ์สวิตช์เพื่อที่จะรักษาสมดุลระหว่างการสูญเสียของอินเวอร์เตอร์ที่สูงขึ้นกับการลดลงของการสูญเสียในเครื่องจักรกล

### 3-3 Current Source Inverter

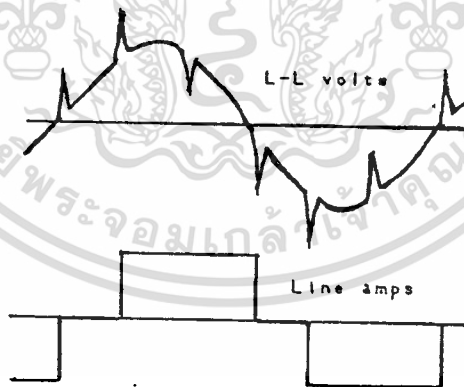
วงจรกำลังของ อินเวอร์แบบจ่ายกระแสแสดงในรูปที่ 3-3 (a) จะประกอบด้วยไทรสเตอร์เรกติไฟเออร์ ที่สามารถควบคุมได้โดยการควบคุมเฟสของเอซีไลน์ และยังมีอินดักเตอร์ขนาดใหญ่ต่ออนุกรมอยู่ แต่ไม่มีตัวเก็บประจุต่อขนานอยู่ด้วยเพื่อสร้างแหล่งจ่ายกระแสให้กับอินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นข้อแตกต่างของโครงสร้างทางวงจรจากโวลต์เดจเซอร์อินเวอร์เตอร์ อย่างไรก็ตาม อาจใช้ไดโอดเรกติไฟเออร์กับคิซีลิ่งเพื่อทำหน้าที่ควบคุมกระแสได้เหมือนกันในส่วนของอินเวอร์เตอร์มีไทรสเตอร์ เพื่อทำหน้าที่ควบคุมกระแสที่สามารถเปลี่ยนความถี่ได้เพื่อจ่ายให้กับเครื่องจักรกล รูปร่างของกระแสที่จ่ายออกทางด้านเอาต์พุต ขึ้นอยู่กับแพทเทิร์นของการควบคุมที่อินเวอร์เตอร์อาจจะเป็น 6-step หรือ PWM ก็ได้ แต่ลักษณะของแรงดันทางด้านเอาต์พุตจะมีรูปร่างเข้าใกล้รูปซายน์ (ซึ่งเป็นข้อแตกต่างจากโวลต์เดจเซอร์สในเรื่องของรูปคลื่น) นอกจากนี้ แรงดันทางด้านเอาต์พุตยังเกิดสไปค์เนื่องจากคอมมิวเตตดังแสดงในรูปที่ 3-3 (b)

สำหรับรูปคลื่นกระแส 6 – step ที่เกิดใน Current fed inverter นี้อาจเป็นปัญหาของความร้อนเนื่องจากฮาร์โมนิกส์ และการออสซิลเลตของแรงบิดในขณะที่ทำงานที่ความเร็วรอบต่ำ การกระเพื่อมของแรงบิด (torque pulsation) นี้สามารถที่จะลดให้น้อยลงได้โดยการใช้เทคนิค PWM ถ้าเป็นเครื่องจักรกลขนาดกำลังสูง ๆ อาจใช้อินเวอร์เตอร์สองตัวที่มีเฟสชิฟที่สามารถสร้างรูปกระแสเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12-step ได้ ซึ่งผลของฮาร์โมนิกส์และการกระเพื่อมของแรงบิดของ 12 - step อินเวอร์เตอร์นี้จะลดลงไปมากเมื่อเทียบกับ 6 - step



รูปที่ 3-3 (a) วงจรกำลังของ Current Source Inverter



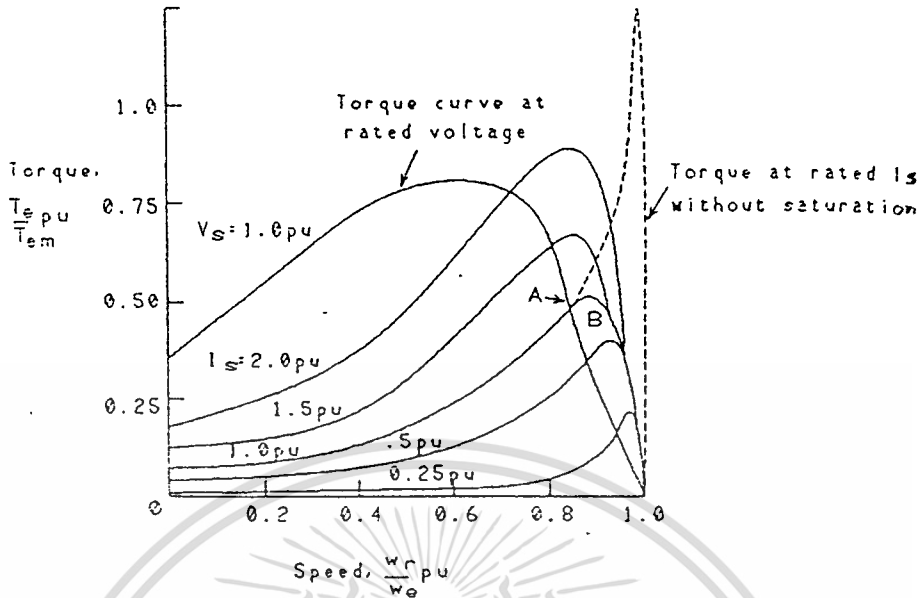
รูปที่ 3-3 (b) แสดงแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุต

Current fed inverter drive มีข้อดีหลาย ๆ อย่างซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้ วงจรกำลังจะใหญ่และไว้วางใจได้ดี และไม่มีโอกาสที่จะมีการ ลัดวงจร อย่างเช่นใน voltage fed inverter อินเวอร์เตอร์สามารถฟื้นคืนจากการล้มเหลวของ commutation ของไทรสเตอร์ได้ กระแสฟลัทท์ที่เกิดขึ้นในอินเวอร์เตอร์จะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ซึ่งสามารถเคลียร์ โดยการลดสัญญาณแกทของเรกติไฟเออร์ได้ นอกเหนือจากนี้จำนวนคอมโพเนนท์ในอินเวอร์เตอร์ยังน้อย จะทำให้การสูญเสียเนื่องจากการคอมมิวเททไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่อนข้างต่ำลง เพราะเนื่องจากการควบคุมไทรสเตอร์เพียงหกตัวทำให้วงจรควบคุมง่าย และมีเสถียรภาพมากขึ้น อินเวอร์เตอร์สามารถออกแบบให้ใช้ไทรสเตอร์เพียงหกตัวทำให้วงจรควบคุมง่ายและมีเสถียรภาพมากขึ้น อินเวอร์เตอร์สามารถออกแบบให้ใช้ไทรสเตอร์ที่มีเกรด ความเร็วต่ำ (low speed) ในส่วนของเรกติไฟเออร์ได้ลักษณะที่สำคัญอย่างหนึ่งของ Current fed inverter คือการทำงานในโหมดของรีเจนเนอเรทีฟ (regenerative) โดยเมชชีนจะทำหน้าที่เป็น เซ็นเนอร์เรเตอร์ (generator) ที่มี สลลพ เป็นลบและมุมจุดชนวน ของไทรสเตอร์อินเวอร์เตอร์จะปรับค่า เพื่อให้แรงดันอินพุต  $V_u$  กลับชั่ว ขณะที่กระแส  $I_d$  ยังคงมีทิศทางเดิมอยู่ แรงดันเรกติไฟเออร์  $V_d$  จะกลับทิศโดยการหน่วงมุมจุดชนวน ดังนั้นจึงมี กำลังไฟฟ้าเข้ามายัง แหล่งจ่าย

ถึงแม้ว่าจะมีข้อดีมากมายที่ได้กล่าวมาแล้วสำหรับ Current fed inverter แต่ก็ยังมีข้อจำกัดอีกมากคือ ช่วงความถี่ของอินเวอร์เตอร์ที่สามารถปรับได้ค่อนข้างต่ำ และไม่สามารถทำงานได้ที่สถานะไรโวลต์ ซึ่งต้องมีกระแสไหลค่าน้อยที่สุดที่จะทำให้มีการคอมมิวเตทในอินเวอร์เตอร์ได้และนอกจากนี้ขนาดของตัวเหนี่ยวนำในส่วนของคิซึลิ่ง และตัวเก็บประจุของการคอมมิวเตทจะใหญ่ทำให้อินเวอร์เตอร์แบบนี้ค่อนข้างใหญ่เทอะทะราคาแพง การคอมมิวเตทจะขึ้นอยู่กับค่าชัตทรานเซียนตัวเหนี่ยวนำ ของเครื่องจักรกลซึ่งเป็นการเพิ่มค่า แรงดันเหนื่อค่าชั่วขณะ(transient over voltage) ที่ชั่วของเครื่องจักรกลได้ การตอบสนองของการขับ นี้ค่อนข้างช้าและมีแนวโน้มที่จะมีปัญหาของการเสถียรภาพที่ ไรโวลต์ และสถานะความเร็วรอบสูง Current fed inverter นี้จะใช้ได้ในมอเตอร์เพียงตัวเดียว และมีขนาดกำลังปานกลางไปจนถึงขนาดกำลังสูง ถ้านำไปใช้กับมอเตอร์หลาย ๆ ตัวจะมีปัญหามาก

ในรูปที่ 3-4 ลักษณะคุณสมบัติ torque-speed ของมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนโดย Current fed inverter สำหรับกระแส  $I_d$  ต่างๆกันโดยความถี่มีค่าคงที่จะเป็นได้ว่าแรงบิดของมอเตอร์ในตอนเริ่มเดินเครื่อง



รูปที่ 3-4 แสดง Torque – speed curves ที่มีการเปลี่ยนแปลงกระแสที่ stator

จะมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับการขับเคลื่อนโดยใช้ Voltage fed inverter ทั้งนี้เพราะที่ความเร็วต่ำ ๆ โรเตอร์อิมพีแดนซ์จะมีค่าทำให้แรงดันของมอเตอร์ต่ำเมื่อแรงดันเข้ามอเตอร์น้อยฟลักซ์ของอากาศ (air gap flux) จะมีค่าน้อย ดังนั้นแรงบิดของ มอเตอร์เหนี่ยวนำจึงต่ำ เมื่อความเร็วของมอเตอร์เพิ่มขึ้น แรงดันที่เข้ามอเตอร์จะเพิ่มขึ้นทำให้ฟลักซ์ของอากาศและแรงบิดเพิ่มขึ้นตาม ถ้าแกนเหล็กของมอเตอร์ไม่อิ่มตัวทอร์คของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อความเร็วเข้าใกล้ความเร็วซิงโครนัส จากนั้นก็จะลดลงด้วยสโลปที่ชันมาก และมีค่าเป็นศูนย์เมื่อความเร็วเท่ากับความเร็วซิงโครนัส ตามเส้นกราฟที่เป็นเส้นประ อย่างไรก็ตามก็ดี เนื่องจากการอิ่มตัวของแกนเหล็กของมอเตอร์ ทำให้แรงบิดของมอเตอร์จะแปรตามความเร็วตามกราฟที่เป็นเส้นทึบ เราจะสามารถควบคุมให้มอเตอร์ทำงานในช่วงที่ torque-speed curve ของมอเตอร์มีสโลปเป็นบวกตามแนวที่จุดตัด ระหว่างลักษณะสมบัติของ voltage fed และ current fed inverter (A) หรืออาจควบคุมให้มอเตอร์มีสโลปเป็นลบ (B) การทำงานในบริเวณค่าสโลปเป็นบวกจะมีสลิปสูงทำให้ กระแสโรเตอร์(rotor current) และการสูญเสียที่โรเตอร์มากกว่าแต่ฟลักซ์ของอากาศจะไม่อิ่มตัวและกระแสแมกเนไตซิง(magnetizing current) จะมีค่าเท่ากับค่าที่กำหนดแต่ถ้ามอเตอร์ทำงานในบริเวณที่สโลปเป็นลบ rotor current จะมีค่าน้อย แต่เนื่องจากแกนเหล็กของมอเตอร์จะเริ่มอิ่มตัวดังนั้น magnetizing current และ Iron loss ซึ่งมีค่ามากกว่าที่จุด A ทำให้มอเตอร์ร้อน ดังนั้น เราจึงมักจะให้มอเตอร์ทำงานในบริเวณที่สโลปเป็นบวก แต่เนื่องจากในบริเวณดังกล่าวมอเตอร์จะไม่มีเสถียรภาพ ดังนั้นเราจึงมักจะให้มอเตอร์ทำงานในบริเวณที่มีสโลปเป็นบวก แต่เนื่องจากในบริเวณดังกล่าวมอเตอร์จะไม่มีเสถียรภาพ ดังนั้นเราจึงจำ

จะต้องมีการควบคุมการป้อนกลับเพื่อรักษาให้ฟลักซ์ของอากาศคงที่ซึ่งทำได้โดยการควบคุมกระแสและสลิปของมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนด้วย Current fed inverter แปรไปตาม torque-speed curve ที่มีสลิปเป็นลบของมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนด้วย voltage fed inverter หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือเราจะควบคุมให้มอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่ขับเคลื่อนด้วย current fed inverter ทำงานในช่องฟลักซ์ของอากาศคงที่ (constant air gap flux mode)

### 3-4 เทคนิคการสร้าง PWM แบบต่าง ๆ สำหรับ อินเวอร์เตอร์

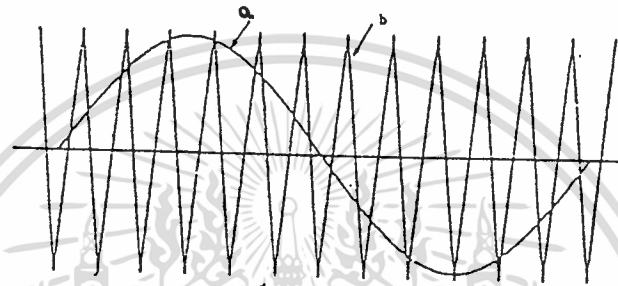
ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว 6-step อินเวอร์เตอร์ นั้นเหมาะสำหรับช่วงความถี่ของอินเวอร์เตอร์มีค่าสูง เพราะสัญญาณควบคุมค่อนข้างง่ายและการสูญเสียของการสวิตช์ซึ่งต่ำเนื่องจากจำนวนครั้งของการสวิตช์ต่อหนึ่งไซเคิลของความถี่มูลฐานมีค่าต่ำแต่ปัญหาที่พบในอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้ คือผลของฮาร์โมนิกส์จะมีผลต่อการสูญเสียในเครื่องจักรกล และการกระเพื่อมของแรงบิดที่ความถี่ของอินเวอร์เตอร์มีค่าต่ำ ๆ นอกจากนี้ค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์ทางด้านอินพุตจะมีค่าต่ำเนื่องจากการใช้เรกติไฟเออร์ที่มีการควบคุมแบบเลื่อนเฟส และปัญหาการเสถียรภาพจะมีมากขึ้นที่ความเร็วรอบมอเตอร์ต่ำเนื่องจาก LC ฟิลเตอร์ในคิซึลิ่ง

จากปัญหาเหล่านี้สามารถที่จะแก้ไขได้โดยการใช้ PWM อินเวอร์เตอร์ ซึ่งคิซึลิ่งได้จากเรกติไฟเออร์ที่เป็นบริดจ์ไดโอดและ LC ฟิลเตอร์ ดังนั้นแรงดันและความถี่ขององค์ประกอบมูลฐานจะถูกควบคุมโดยวงจรอิเล็กทรอนิกส์อยู่ในอินเวอร์เตอร์ โดยสร้างเป็นพัลส์วิดท์หลาย ๆ พัลส์ โครงสร้างของ PWM อินเวอร์เตอร์ แสดงในรูปที่ 3-2 แต่อุปกรณ์สวิตช์จะถูกสวิตช์ให้เปิดและปิดเป็นจำนวนหลาย ๆ ครั้งในหนึ่งไซเคิลของการควบคุมแรงดัน ดังนั้นองค์ประกอบของฮาร์โมนิกส์อันดับต่ำจึงไม่เกิดขึ้นเทคนิคของ PWM ทั่ว ๆ ไปสามารถแยกได้ดังนี้

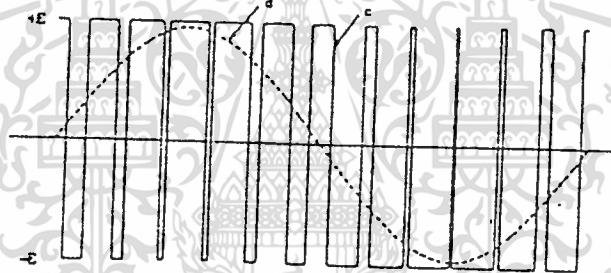
#### 3-4-1 Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM)

เป็นเทคนิคที่นิยม ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมสามารถสร้างได้โดยการใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นวิธีที่สะดวกที่สุดหรืออาจใช้วิธีไมโครโปรเซสเซอร์โดยโปรแกรมให้ไมโครโปรเซสเซอร์ ส่งสัญญาณสถานะสวิตช์ซึ่งเป็นวิธีที่แน่นอน หลักการของ Natural Sampled PWM จะใช้คลื่นพาหะเป็นรูปสามเหลี่ยมนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปไซน์ ซึ่งเป็นสัญญาณเมื่อคูณแล้วที่มีความถี่มูลฐานของการเปรียบเทียบกันจะเกิดจุดตัดกันของรูปคลื่นทั้งสองนำมากำหนดเป็นสัญญาณการสวิตช์ของไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์สวิตช์ของอุปกรณ์สวิตชิงในวงจรหลักของอินเวอร์เตอร์ ในรูปที่ 3-5 (a) เป็นลักษณะของ NSPWM ชนิด 2 ระดับ ซึ่งเป็นรูปคลื่นที่มีการสวิตช์ 2 ระดับ คือ  $+E$  และ  $-E$  และลักษณะของ NSPWM ชนิด 3 ระดับ ซึ่งเป็นรูปคลื่นที่มีการสวิตช์ 3 ระดับ คือ  $+E, 0$  และ  $-E$  ซึ่ง PWM ชนิด 3 ระดับ ผลของฮาร์โมนิกส์อันดับต่ำจะมีค่าน้อยกว่าชนิด 2 ระดับสำหรับคลื่นพาหะที่เป็นสามเหลี่ยมนี้ จะใช้ร่วมกันของทั้งสามเฟส ทำให้ได้รูปคลื่นเอาต์ของสามเฟสอินเวอร์เตอร์ตามรูป 3-5 (b)

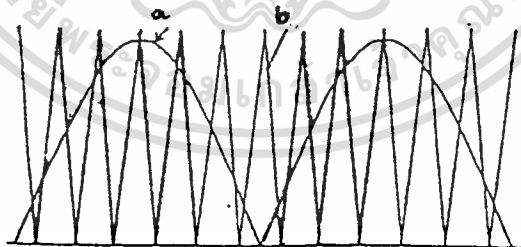


(a)

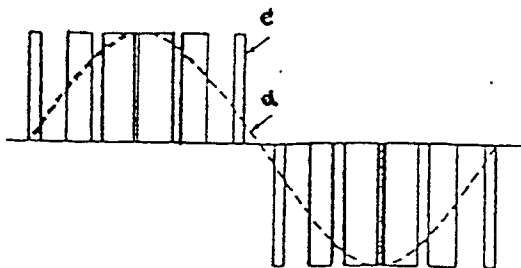


(b)

กรณี SPWM 2 ระดับ



(c)



(d)

กรณี SPWM 3 ระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

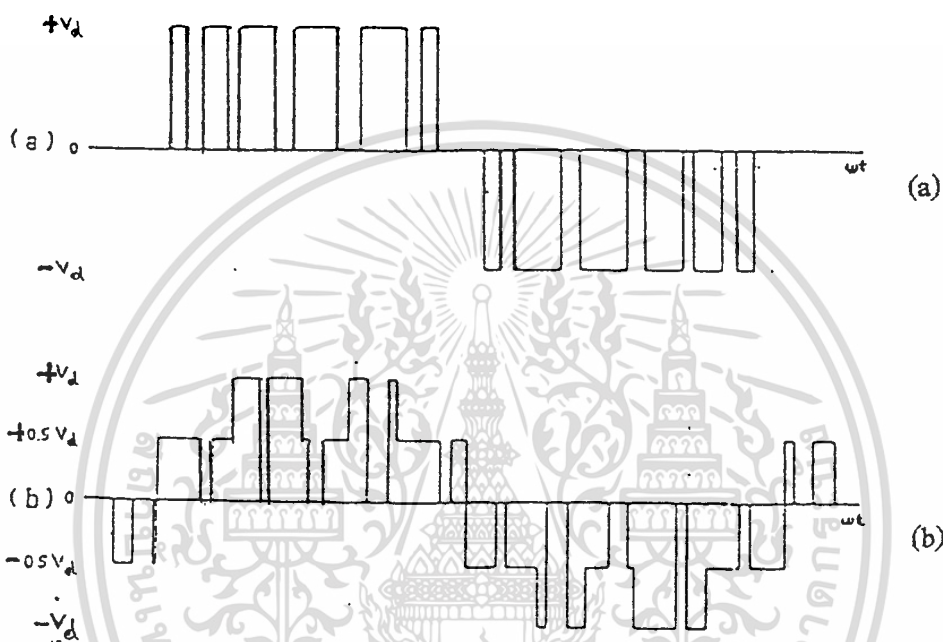
รูปที่ 3-5 (a) แสดงรูปคลื่น

a : สัญญาณอ้างอิงรูปซายน์

b : สัญญาณคลื่นพาหะ

c : สัญญาณสวิตชิง

d : สัญญาณพินคาเมนทอล



รูปที่ 3-5 (b) แสดงแรงดันไลน์ และเฟส ของ PWM อินเวอร์เตอร์

(a) แรงดันระหว่างไลน์, (b) แรงดันเฟส

ลักษณะรูปคลื่นของ PWM นี้จะประกอบด้วยองค์ประกอบมูลฐานที่มีทั้งความถี่และแอมพลิจูดซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้ ควบคุมความถี่และแรงดันตามลำดับของรูปคลื่นสัญญาณมอดูเลต ในการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์ของรูปคลื่นเอาต์พุตสามารถหาได้จากการกระจายฟูเรียร์แบบธรรมดา และแบบ Double Fourier Series Expansion ซึ่งสมการที่เกิดขึ้น โดยใช้วิธีการ Double Fourier คือ

$$V(t) = M(V_d/2)\sin(W_r t + \theta) + \text{Bessel function harmonics term} \quad (3.1)$$

ซึ่ง M คือ ดัชนีของการมอดูเลต

$W_r$  เป็นความถี่มูลฐานซึ่งเป็นความถี่เดียวกับความถี่การมอดูเลต

$\theta$  เป็น phase shift ของเอาต์พุต

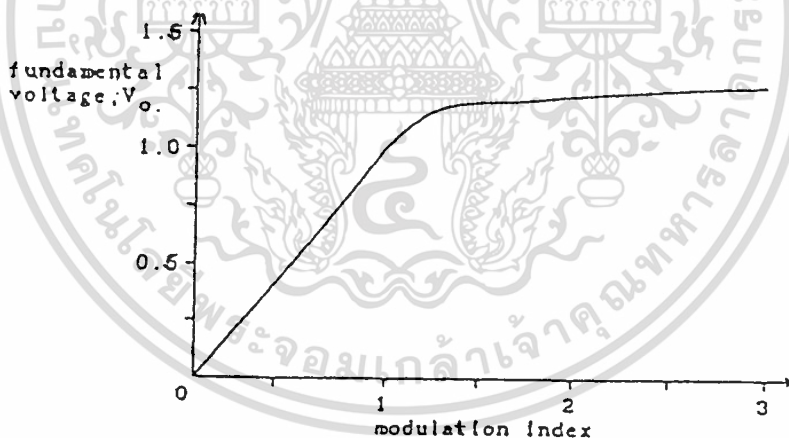
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดัชนีของการมอดูเลตกำหนดโดย  $M = V_p / V$  ซึ่ง

$V_p$  คือ ค่า peak ของแอมพลิจูดสัญญาณการมอดูเลต

$V$  คือ ค่า peak ของแอมพลิจูดคลื่นพาหะ

ในทางอุดมคติแล้วค่า  $M$  จะแปรค่าอยู่ระหว่าง 0 และ 1 และความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันมอดูเลตและเอาต์พุตจะเป็นแบบเชิงเส้นซึ่งถ้าค่า  $M$  มากกว่าหนึ่งจะเกิดการ “over modulation” เป็นผลให้เกิดการหายไปของจำนวนพัลส์ ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันมูลฐาน และดัชนีการมอดูเลตไม่เป็นเชิงเส้น ถ้าเพิ่มค่า  $M$  มาก ๆ ในที่สุดจำนวนพัลส์จะลดลงจนเป็น สแควร์เวฟ(square wave) ซึ่งจะให้ค่ายูติลิตี้ แฟกเตอร์สูง ซึ่งจะให้ค่าแรงดันมูลฐานสูงขึ้นด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันมูลฐานและดัชนีการมอดูเลต แสดงได้ในรูปที่ 3-6 มีเทคนิคบางอย่างที่สามารถเพิ่มแรงดันมูลฐานได้ในขณะอยู่ในช่วงสี่เนียร์โดยการเพิ่มฮาร์โมนิกส์ที่สามเข้าไปรวมกับสัญญาณการมอดูเลต แต่อย่างไรก็ตาม ปัญหาของพัลส์ที่แคบที่สุดของ PWM สามารถทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับการคอมมิวเตชันในไทรสเตอร์ และ snubber relaxation รวมทั้งการลัดวงจรในกึ่ง (shoot through) ของอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นเวลาน้อยที่สุดของวงจรถือเอาที่จึงเป็นสิ่งที่ควรคำนึง



รูปที่ 3-6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันมูลฐานและดัชนีการมอดูเลตของเทคนิค SPWM

อัตราส่วนของความถี่คลื่นพาหะต่อความถี่ของสัญญาณการมอดูเลต หรือสัญญาณอ้างอิง (frequency ratio) จะมีผลต่อความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นและการสูญเสียของอุปกรณ์สวิตชิง และ จะเป็นตัวกำหนดจำนวนพัลส์ PWM ที่เกิดขึ้นในหนึ่งไซเคิล ถ้า อัตราส่วนความถี่(frequency ratio) สูง จำนวนพัลส์ PWM สูง และถ้าอัตราส่วนความถี่ ต่ำจะทำให้พัลส์ PWM ต่ำ จากการวิเคราะห์ห่องค์ ประกอบฮาร์โมนิกส์สรุปได้ว่า ลำดับฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้น คือ

$$n(\omega_c/\omega_m) \pm K \quad (3-2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง ( $W_c$  คือ carrier frequency,  $W_r$  คือ modulating frequency)

โดยที่  $n = 1, 3, 5, \dots$

$K = 0, 2, 4, \dots$

$n = 2, 4, 6, \dots$

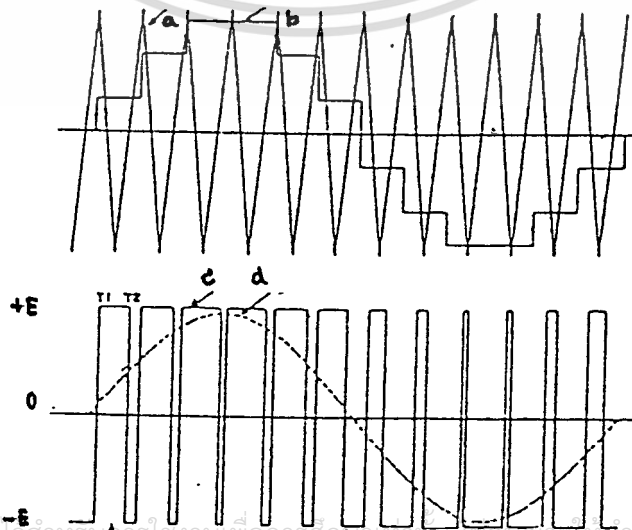
$K = 1, 3, 5, \dots$

เมื่อ  $n$  คือ กลุ่มอันดับฮาร์โมนิกส์หลัก

$K$  คือ อันดับฮาร์โมนิกส์ย่อยหรือรอบข้าง

ลักษณะการเกิดฮาร์โมนิกส์ของเทคนิค SPWM นี้จะเกิดเป็นกลุ่ม ๆ และมีฮาร์โมนิกส์ย่อยอยู่รอบข้างฮาร์โมนิกส์หลัก ดังนั้นลำดับกลุ่มของฮาร์โมนิกส์หลักจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความถี่และขนาดของฮาร์โมนิกส์จะขึ้นอยู่กับดัชนีการมอดูเลตซึ่งหมายความว่าที่ค่าดัชนีการมอดูเลตเดียวกันแต่ค่า อัตราส่วนความถี่ ต่างกัน ขนาดขององค์ประกอบฮาร์โมนิกส์กลุ่มเดียวกันจะมี ขนาดเท่ากันแต่ตำแหน่งการเกิดจะต่างกันเมื่ออัตราส่วนความถี่มีค่าสูงขึ้น จำนวนฮาร์โมนิกส์ของกระแสใน ไลน์ ของอินเวอร์เตอร์ถูกกรองออกด้วยรีแอคแตนซ์รั่ว(leakage reactance) ของมอเตอร์และรูปคลื่นของกระแสยังเข้าไถ่รูปขาขนานมากขึ้นการสูญเสียของการสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตซ์ ซึ่งมีมากขึ้น ดังนั้นการเลือกค่า อัตราส่วนความถี่ จึงขึ้นอยู่กับการยอมรับระหว่างการสูญเสียใน อินเวอร์เตอร์และมอเตอร์ เมื่อค่าอัตราส่วนความถี่ สูงขึ้นการสูญเสียในมอเตอร์จะลดลงก็ตาม แต่จะมีการสูญเสียในอุปกรณ์สวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์มากขึ้นด้วย

เทคนิค PWM ที่นิยมใช้เทคนิคหนึ่งโดยอาศัยเทคนิคแบบ Uniform sampling ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งใช้วิธีหลักการของคลื่นพาหะในหลักการของ Natural sampling พัลส์ที่ได้จะไม่สมมาตรกับแอมป์ของคลื่นพาหะ ในขณะที่ แบบ Uniform Sampling จะสมมาตรกันเสมอ วิธี Uniform sampling จะเป็นวิธีการที่ง่ายกับการที่จะสร้างโดยใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ จะให้ผลลดขนาดของฮาร์โมนิกส์ความถี่ต่ำและสามารถกำจัดฮาร์โมนิกส์ย่อย(subharmonics) ซึ่งเกิดในโหมดของ free-running

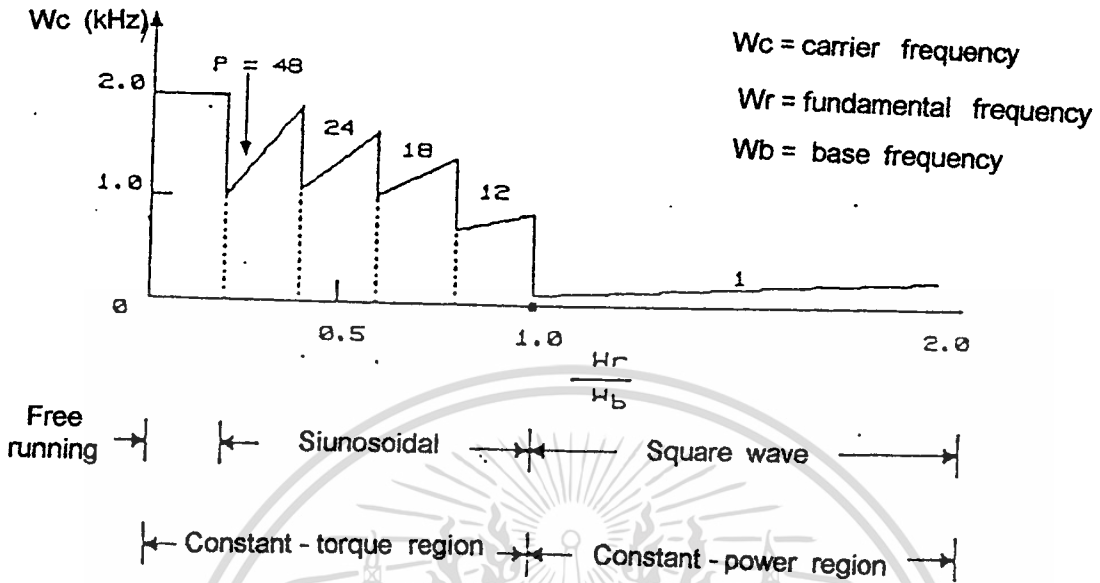


รูปที่ 3-7 เทคนิค PWM แบบ Uniform sampling

นอกจากจะใช้สัญญาณการมอดูเลตที่เป็นรูปไซน์แล้วยังมีการใช้รูปคลื่นสี่เหลี่ยมคางหมูได้เหมือนกัน ซึ่งจะให้พัลส์ที่สมมาตรที่เอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์และสามารถควบคุมแรงดันเอาท์พุทได้อย่างเชิงเส้นจากช่วงศูนย์จนถึงรูปคลื่นสี่เหลี่ยมโดยการเปลี่ยนแอมพลิจูดของคลื่นมอดูเลตแต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเปลี่ยนไปสู่โหมด สแควร์เวฟ แล้ว ฮาร์โมนิกส์ของเอาท์พุทขณะทำงานในโหมดสแควร์เวฟ จะน้อยกว่าในขณะที่ทำงานแบบ PWM ในขณะที่ ยูติลิตี้แฟกเตอร์ ของ สแควร์เวฟ สูงกว่าของ PWM

### 3-4-2 การเปลี่ยนจำนวนพัลส์ PWM สัมพันธ์กับความถี่

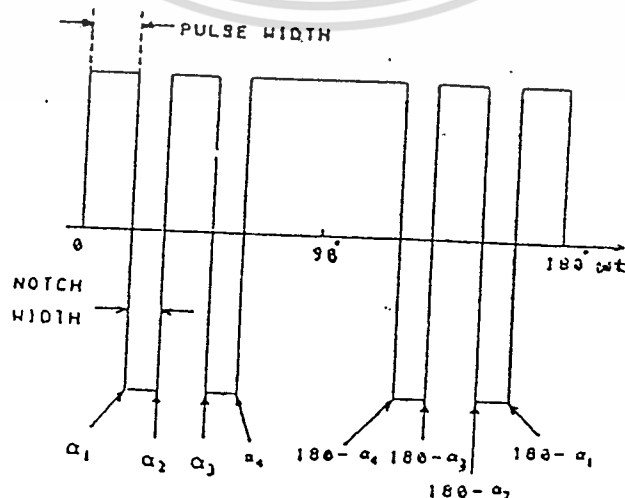
สำหรับในงานการขับเคลื่อนความเร็วของมอเตอร์นั้น แรงดันและความถี่จะต้องเปลี่ยนแปลงตามกัน โดยในย่านกำลังคงที่แรงดันจะต้องถูกควบคุมโดยหลักการของ PWM เพื่อให้ฟลักซ์ในช่องอากาศมีค่าคงที่ เพื่อที่ลดฮาร์โมนิกส์ในแรงดันและกระแสของเอาท์พุทอินเวอร์เตอร์และลดการสูญเสียของการสวิตชิงในอุปกรณ์สวิตชิงจะมีการควบคุมพัลส์ PWM โดยวิธีการเปลี่ยนเกียร์ (gear – changing) แบบซิงโครนัสทำให้จำนวนพัลส์ PWM ต่อไซเคิล เปลี่ยนอย่างทันทีทันใด ซึ่งในช่วงความถี่ของอินเวอร์เตอร์ต่ำจะกำหนดให้จำนวนพัลส์ PWM สูง ในช่วงความถี่อินเวอร์เตอร์สูงจะทำให้จำนวนพัลส์ PWM สูงในช่วงความถี่อินเวอร์เตอร์สูงจะทำให้จำนวนพัลส์ PWM ต่ำลง ก็จะเป็นการจำกัดความถี่ของการสวิตชิงไม่ให้เกินขอบเขตที่กำหนดไว้ จากรูปที่ 3.8 ที่ค่าความถี่มูลฐานต่ำความถี่ของคลื่นพาหะถูกรักษาให้มีค่าคงที่ การทำงานของอินเวอร์เตอร์จะอยู่ในโหมด ฟรีรันนิ่ง หรืออซิงโครนัสซึ่งจะทำให้เฟสมีการเลื่อนไปมาอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดปัญหาฮาร์โมนิกส์บ่อบแต่อย่างไรก็ตาม ผลอันตรายนี้นี้ไม่ต้องคำนึงถึงเพราะว่าอัตราส่วนของความถี่มีค่ามาก เมื่อความถี่มูลฐานมีค่าสูงขึ้น ค่า P จะเปลี่ยนค่าเป็นสลับแบบซิงโครนัสมีค่าลดลงเพื่อที่จะให้ค่าความถี่ของคลื่นพาหะที่มีค่าสูงสุด และค่าสุดยังคงอยู่ในขอบเขตที่กำหนด จนกระทั่งใกล้ความถี่กำหนดจะมีการเปลี่ยนจากโหมดซิงโครนัส PWM ไปสู่โหมด สแควร์เวฟ ซึ่งในขณะนี้ความถี่ของคลื่นพาหะจะมีค่าเท่ากับค่าความถี่มูลฐาน ดังนั้น การควบคุมพัลส์จึงควรออกแบบให้เหมาะสมเพื่อไม่ให้มีการเปลี่ยนแรงดันในขณะที่มีการเปลี่ยนค่า P และนอกจากนี้ควรหลีกเลี่ยงปัญหาการ เปลี่ยนกลับมาของค่า P ที่อยู่ติดกันโดยการสร้างแถบฮิสเตอร์รีซิส (hysteresis band) ณ จุดวิกฤตของการเปลี่ยนค่า P



รูปที่ 3-8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่มูลฐานและความถี่สวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์

### 3-5 เทคนิคการกำจัดฮาร์โมนิกส์

เทคนิคนี้สามารถควบคุมแรงดันมูลฐานและกำลังประกอบฮาร์โมนิกส์ที่ไม่ต้องการออกไปหลักการของวิธีการนี้ จะทำการคำนวณหามุมของการสวิตช์โดยใช้สมการการกระจายอนุกรมฟูเรียร์แบบทั่วไปตำแหน่งมุมและสถานะสวิตช์ซึ่งถูกเก็บในรูปแบบ look-up table ไว้ในหน่วยความจำ โดยมีไมโครโปรเซสเซอร์ และ down counter ทำงานร่วมกันเพื่อสร้างสัญญาณ PWM โดยดึงข้อมูลที่เก็บไว้ในหน่วยความจำออกมา



รูปที่ 3-9 แสดงรูป PWM โดยวิธีการกำจัดฮาร์โมนิกส์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3-9 ลักษณะคลื่นจะสมมาตรหนึ่งในสี่ ของคาบและสมการอนุกรมฟูเรียร์ของฟังก์ชัน คือ

$$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\theta + b_n \sin n\theta) \quad (3-3)$$

$$\text{ซึ่ง } a_n = \left(\frac{1}{\pi}\right) \int f(t) \cos n\theta d\theta \quad (3-4)$$

$$b_n = \left(\frac{1}{\pi}\right) \int f(t) \sin n\theta d\theta \quad (3-5)$$

เนื่องจากลักษณะแรงดันรูปคลื่น PWM ตามรูป 3.5 ดังนั้น จะมีแต่ฮาร์โมนิกส์ที่เท่านั้นจะได้ว่า

$$a_n = 0 \quad (3-6)$$

$$b_n = \left(\frac{4}{\pi}\right) \int f(t) \sin n\theta d\theta \quad (3-7)$$

สมมติให้แรงดันรูปคลื่น PWM มีแอมพลิจูด  $f(t) = 1$  ดังนั้น

$$b_n = \left(\frac{4}{n\pi}\right) \left[ 1 + 2(-\cos n\alpha_1 + \cos n\alpha_2 - \dots + \cos n\alpha_k) \right] \quad (3-8)$$

$$b_n = \left( \frac{4}{n\pi} \right) \left[ 1 + 2 \sum_{k=1}^m (-1)^k \cos n\alpha_k \right] \quad (3-9)$$

โดยที่ สมการ (3-8) จะประกอบด้วยตัวแปร  $k$  ตัว (เช่น  $a_1, a_2, a_3, \dots, a_k$ ) ซึ่งจะมี  $k$  สมการเพื่อที่จะแก้สมการหาจำนวน  $k$  ตัว ซึ่งแรงดันมูลฐานสามารถถูกควบคุมได้และ จะมีฮาร์โมนิกส์ที่ถูกจำกัด  $k-1$  ฮาร์โมนิกส์ อย่างไรก็ตาม ฮาร์โมนิกส์อันดับสามและอันดับฮาร์โมนิกส์อันดับที่มีผลคูณของ 3 จะถูกจำกัดไปเมื่อใช้กับไฟสามเฟส เช่น สมมติให้  $k=3$  ดังนั้นสามารถเขียนสมการ ได้ 3 สมการดังนี้คือ

องค์ประกอบมูลฐาน :

$$b_n = \left( \frac{4}{\pi} \right) \left[ 1 - 2 \cos \alpha_1 + 2 \cos \alpha_2 - 2 \cos \alpha_3 \right] \quad (3-10)$$

องค์ประกอบฮาร์โมนิกส์อันดับ 5 :

$$b_n = \left( \frac{4}{5\pi} \right) \left[ 1 - 2 \cos 5\alpha_1 + 2 \cos 5\alpha_2 - 2 \cos 5\alpha_3 \right] \quad (3-11)$$

$$= 0$$

องค์ประกอบฮาร์โมนิกส์อันดับ 7 :

$$b_n = \left( \frac{4}{7\pi} \right) \left[ 1 - 2 \cos 7\alpha_1 + 2 \cos 7\alpha_2 - 2 \cos 7\alpha_3 \right] \quad (3-12)$$

$$= 0$$

ซึ่งสมการ 3 สมการข้างบนนี้ สามารถใช้วิธีการทางนิวเมอริกอลโดยใช้วิธีนิวตันราฟสันหลายตัวแปรเพื่อแก้สมการ  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  สำหรับองค์ประกอบมูลฐานที่ต้องการ

ข้อเสียของวิธีนี้คือถ้าต้องการกำจัดฮาร์โมนิกส์หลาย ๆ อันดับจะทำให้มีการเก็บตำแหน่งมุมและสถานะมุมสวิตช์ในหน่วยความจำเป็นจำนวนมากทำให้ไม่สะดวก ดังนั้นจึงมีการใช้เทคนิคผสมของเทคนิค PWM (hybrid PWM) ซึ่งเป็นเทคนิคอย่างหนึ่งที่น่าสนใจมากโดยเมื่ออินเวอร์เตอร์

ทำงานในย่านความถี่และแรงดันต่ำจะใช้วิธี SPWM ในขณะที่ย่านความถี่สูงและแรงดันสูงจะใช้วิธีไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำจัดฮาร์โมนิกส์ ทำให้ไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการสูญเสียเนื่องจากฮาร์โมนิกส์และสวิตช์ วิธีการกำจัดฮาร์โมนิกส์ยังสามารถใช้ในบ้านกำลังคงที่(constant power) ได้อีกด้วย

### 3-6 เทคนิค Minimum Tipple Current

ข้อเสียของเทคนิคการกำจัดฮาร์โมนิกส์อีกอย่างหนึ่งก็คือ จะทำให้ฮาร์โมนิกส์อันดับต่ำที่ไม่ต้องการกำจัดมีค่าสูงขึ้นอย่างมาก เพราะว่า การสูญเสียในเครื่องจักรเนื่องจากผลฮาร์โมนิกส์ถูกกำหนดโดยกระแสรีเปิลอาร์ เอ็ม เอส (rms. ripple current) ดังนั้นกระแสรีเปิลจึงเป็นพารามิเตอร์ที่ควรพิจารณาให้มีค่าน้อยที่สุดแทนที่จะไปกำจัดฮาร์โมนิกส์ที่ต้องการออกไป เทคนิคนี้จะสมมุติให้ไม่คิดผลของ skin effect ของพารามิเตอร์ เครื่องจักรซึ่งอาจจะเป็นสิ่งที่ไม่ถูกต้องมากนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งแล้วสำหรับขดโรเตอร์สมการ rms. ripple current ถูกกำหนดโดย

$$I_{\text{ripple}} = \sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2 + \dots} \quad (3-13)$$

$$I_{\text{ripple}} = \sqrt{\frac{I_{3m}^2}{2} + \frac{I_{5m}^2}{2} + \frac{I_{7m}^2}{2} + \frac{I_{9m}^2}{2}} \quad (3-14)$$

$$I_{\text{ripple}} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{n=3}^{\infty} \left( \frac{V_n}{n\omega_E L} \right)^2} \quad (3-15)$$

ซึ่ง

$I_3, I_5$  = กระแส rms ของฮาร์โมนิกส์อันดับ 3, 5, ets

$I_{3m}, I_{5m}$ , etc. = ค่าพีคของกระแสฮาร์โมนิกส์

$n$  = อันดับของฮาร์โมนิกส์

$V_n$  = ค่าพีคขององค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ อันดับที่  $n$

$L$  = ลีแกน อินดักแตนซ์ ของเครื่องจักรต่อ เฟส

$\omega_E$  = ความถี่เชิงมุมมูลฐาน

ดังนั้น กำลังสูญเสียของขดลวดเนื่องจากผลของฮาร์โมนิกส์ คือ  $P_L = 3I_{\text{ripple}}^2 R$  ซึ่ง  $R$  คือ effective resistance ของเครื่องจักรต่อเฟส

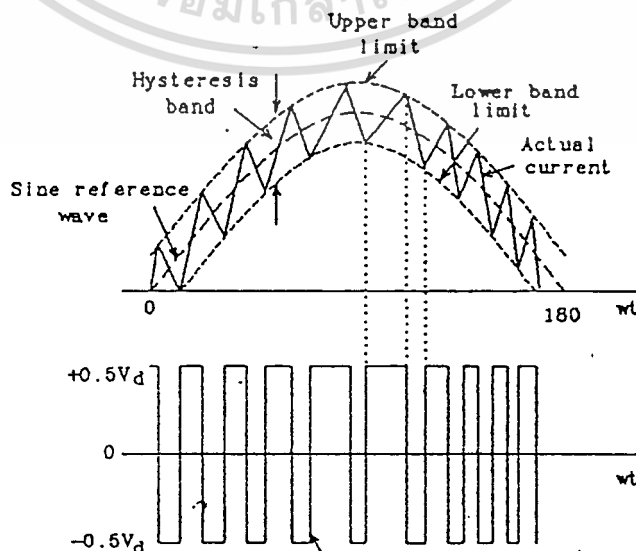
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

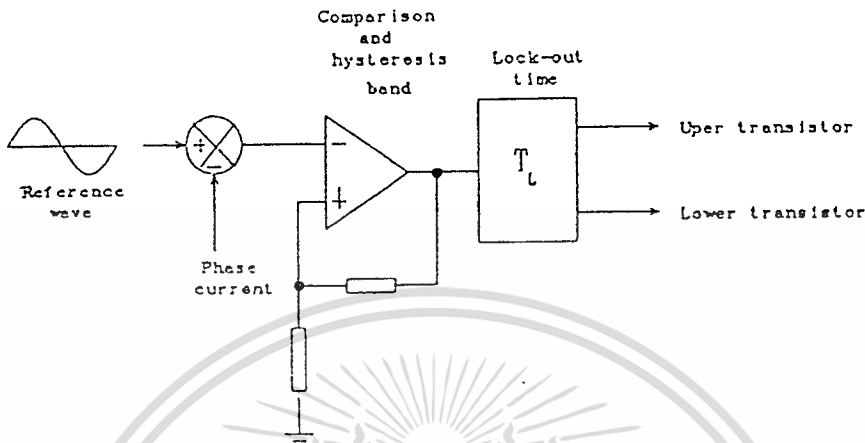
จากสมการที่ 3-9 ซึ่งเป็นการหาตำแหน่งมุมแทนลงในสมการที่ 3.14 ก็จะพบว่า  $I_{\text{ripple}}$  เป็นฟังก์ชันของตำแหน่งมุม โดยการใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ก็สามารถแก้  $\alpha$  ตำแหน่งมุมที่ทำให้เกิด  $I_{\text{ripple}}$  น้อยที่สุดได้ ดังนั้นเทคนิคการพิจารณาให้ harmonic loss มีค่าน้อยที่สุดจะเป็นสิ่งที่ต้องการมากกว่าเทคนิคการกำจัดฮาร์โมนิกส์

### 3-7 วิธี Adaptive Current Control PWM

จากการวิเคราะห์ลักษณะฮาร์โมนิกส์ของรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตของ VSI ที่ได้กล่าวแล้วนั้น ได้สมมติให้ แรงดัน คีชี-ลิ่งค์มีค่าในทางอุดมคติจะมีคงที่โดยไม่เกิดริบเปิด แต่ในทางปฏิบัติริบเปิดจะเกิดได้เนื่องจากค่าของ LC หรือ C filter มีค่าไม่มากพอ ดังนั้น เทคนิค PWM ที่สามารถควบคุมกระแสโดยขอบเขตของฮิสเตอร์รีซิส หรือมีการปรับตัวเองโดยอัตโนมัติก็จะแก้ปัญหานี้ ได้เป็นอย่างดี เทคนิคนี้จะให้การควบคุมกระแสลักษณะการเกิดตามรูป 3-10 (a) โดยวงจรควบคุมจะสร้างกระแสขายน้่าอ้างอิงซึ่งมีขนาดและความถี่ตามต้องการซึ่งจะนำมาเปรียบเทียบกับกระแสฟาสจริงตามรูปที่ 3-10 (b)

เมื่อกระแสเกินค่าขอบเขตฮิสเตอร์รีซิสที่กำหนดไว้ ทรานซิสเตอร์ตัวบนในกิ่งของวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์จะหยุดนำกระแส (turn off) ในขณะที่ทรานซิสเตอร์ตัวล่างจะนำกระแส (turn on) เป็นผลให้แรงดันเอาต์พุตเปลี่ยนจาก  $+0.5V_d$  เป็น  $-0.5V_d$  และกระแสจะเริ่มลดลงจนกระทั่งกระแสลดลงมาถึงขอบเขตล่างของฮิสเตอร์รีซิสจะมีการเปลี่ยนการสวิตช์ โดยทรานซิสเตอร์ตัวบนจะนำกระแส และทรานซิสเตอร์ตัวล่างจะหยุดนำกระแส ซึ่งเป็นการครบรอบของการสวิตช์





รูปที่ 3-10 (b) แสดงวงจรควบคุมเทคนิค Adaptive Current Control

ในวงจรรูป 3-10 (b)  $T_L$  จะเป็นเวลาเดดไทม์ของวงจรล็อก-เอาต์ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการฟอลท์เนื่องจาก การลัดวงจร ของทรานซิสเตอร์ตัวบนและล่าง กระแสจริงจะถูกบังคับให้ติดตามสัญญาณชาน์อ้างอิง ให้อยู่ในขอบเขตฮิสเตอร์รีซิสที่ต้องการ โดยการสวิตช์กลับไปกลับมาของทรานซิสเตอร์ตัวบนและล่าง ดังนั้นกระแสรีเปิล พิก - ทู - พิก จึงถูกควบคุมให้ปรับตัวอยู่ในขอบเขตฮิสเตอร์รีซิสตามค่า  $V_d$  ที่มีการกระเพื่อม ดังนั้นกระแสรีเปิลอาร์เอ็มเอส (rms ripple current) ซึ่งจะสัมพันธ์กับกระแสรีเปิลพิก-ทู-พิก (peak to peak ripple current) ซึ่งจะถูกควบคุมทำให้ลดการความร้อน (heating) ของเครื่องจักร การควบคุมกระแสพิกอย่าง อินสแตนเตเนียส (instantaneous) จะเป็นข้อดีสำหรับอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งอย่างเช่น เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ซึ่งจะไวต่อกระแสพิกมาก โหมดการควบคุมกระแส สามารถเปลี่ยนจากโหมด PWM ไปสู่โหมดแรงดันสแควร์เวฟ ซึ่งอยู่ในย่านกำลังคงที่ ได้อย่างต่อเนื่อง

## ฮาร์โมนิกส์และผลกระทบต่อเครื่องจักรไฟฟ้า

### 4-1 การทำงานของมอเตอร์ไฟต์ดับเมื่อมีฮาร์โมนิกส์

ในการศึกษาการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยทั่วไป ซึ่งพื้นฐานของการศึกษามีสมมุติฐานว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำทำงานในสถานะของแหล่งจ่ายเป็นคลื่นไซน์ (Sinusoidal Supply Waveforms) แต่ในการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ไม่ถูกใช้งานในสถานะแหล่งจ่ายเป็นคลื่นไซน์ แต่จะถูกใช้งานในสถานะแหล่งจ่ายไม่เป็นคลื่นไซน์ (Non-sinusoidal Supply Waveforms) เนื่องจากในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมมักจะควบคุมจากอินเวอร์เตอร์โดยการเปลี่ยนแปลงความถี่ซึ่งจะมีผลต่อความเร็วเนื่องจาก  $n = \frac{120 f}{p}$  ซึ่งในการใช้อินเวอร์เตอร์ปรับความเร็ว ทำให้อัตราการเหนี่ยวนำทำงานภายในสถานะไม่ใช่อื่นใดอื่น ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนพื้นฐาน (Fundamental) และ ฮาร์โมนิกส์ ลำดับต่าง ๆ ซึ่งจะต้องศึกษาผลกระทบต่อ ฮาร์โมนิกส์ ลำดับต่าง ๆ ในเครื่องจักร

### 4-1 ศัพท์และปริมาณต่าง ๆ ในเรื่องฮาร์โมนิกส์

ศัพท์ที่สำคัญในการศึกษา ระบุ และวัดความเพี้ยนเรื่องฮาร์โมนิกส์ของระบบ ที่สำคัญมีดังนี้

1. Distortion Factor : DF
2. Harmonics Factor : HF
3. Total Harmonic Content : THC
4. Total Harmonic Distortion : THD

คำทั้งหมดนี้จะมีความหมายใกล้เคียงกันมาก ต่างก็ใช้ในการระบุปริมาณของฮาร์โมนิกส์ ที่มีอยู่ทั้งหมด โดยเปรียบเทียบกับค่าอาร์เอ็มเอสของส่วนประกอบความถี่หลักมูล หรือเทียบกับค่าอาร์เอ็มเอส ของปริมาณทั้งหมด ทั้งนี้แล้วแต่มาตรฐานต่าง ๆ จะกำหนดนิยามไว้ในมาตรฐาน IEEE Std. 519:1992

$$DF_v = HV_v = THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \times 100\% \quad (4-1)$$

$$DF_i = HV_i = THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \times 100\% \quad (4-2)$$

จาก AS2279.1 – 1991 และ AS2279.2 – 1991

$$U_T (= THD_v) = \frac{100}{U_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2} \% \quad (4-3)$$

$$I_T (= THD_v) = \frac{100}{I_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \% \quad (4-4)$$

จาก IEC 555 – 1 : 1982

$$HV_v (= THD_v) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2}} \times 100\% \quad (4-5)$$

$$HV_i (= THD_i) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}} \times 100\% \quad (4-6)$$

=  $\frac{\text{ค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันฮาร์โมนิกส์}}{\text{ค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันทั้งหมด}} \times 100\%$

=  $\frac{\text{ค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสฮาร์โมนิกส์}}{\text{ค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสทั้งหมด}} \times 100\%$

ในนิยามของมาตรฐาน IEEE และ AS ค่า THD มีโอกาสเกิน 100% ถ้าในรูปคลื่นของกระแสหรือแรงดันมีฮาร์โมนิกส์ปนอยู่มาก แต่ค่า THD ตามนิยามของมาตรฐาน IEC จะไม่มีโอกาสที่จะเกิน 100%

ดังนั้นในการกล่าวถึงปริมาณ THD ของอุปกรณ์ใด ๆ แล้วจะมีการนำมาเปรียบเทียบกับกันเพื่อดูข้อดีและข้อเสีย จะต้องทำความเข้าใจให้ตรงกันตั้งแต่แรกก่อนว่า THD นั้นนิยามไว้ตามมาตรฐานใด ไม่เช่นนั้นจะทำให้การเปรียบเทียบได้ผลที่ผิดไปจากที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5. ลำดับฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Order k)

ลำดับฮาร์โมนิกส์ คือ อัตราส่วนของความถี่ฮาร์โมนิกส์ และความถี่หลักมูล เช่นเมื่อเรากล่าวถึงฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3 หากความถี่หลักมูลเป็น 50 Hz จะได้ความถี่ของฮาร์โมนิกส์ที่ 3 เป็น 150 Hz แต่ถ้าความถี่หลักมูลเป็น 60 Hz ก็จะได้ความถี่ของฮาร์โมนิกส์ที่ 3 เป็น 180 Hz เป็นต้น

### 6. Displacement Power Factor (DPF)

โดยปกติ เมื่อทำการวิเคราะห์สัญญาณต่าง ๆ ออกมาในรูปองค์ประกอบที่เป็นฮาร์โมนิกส์ต่าง ๆ เราสามารถหาตัวประกอบกำลัง (power factor) โดย

$$PF = \frac{\text{active power}}{\text{appearance power}} = \frac{V_1 I_1}{V_1 I_{rms}} \cos \phi_1 = \frac{I_1}{I_{rms}} \cos \phi_1 \quad (4-7)$$

เราเรียก  $\cos \phi_1$  ว่า Displacement Power Factor หรือ DPF โดยที่  $\phi_1$  เป็นมุมซึ่ง องค์ประกอบกระแสที่มีความถี่เท่ากับความถี่หลักมูล (Fundamental component) ล้าหลัง (lag) องค์ประกอบแรงดันที่มีความถี่เท่ากับความถี่หลักมูล นั่นคือ

$$DPF = \cos \phi_1 \quad (4-8)$$

### 7. Total Power Factor (PF)

เมื่อเรากล่าวถึงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor) ตามนิยามแล้วจะหมายถึง อัตราส่วนของกำลังงานจริง (W หรือ kW) ต่อกำลังงานปรากฏ (VA หรือ kVA) และถ้าหากรูปคลื่นของแรงดันและกระแสมีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์เราอาจหาคู่ถึงตัวประกอบกำลังในเทอมของ cosine ของมุมระหว่างแรงดันกับกระแสก็ได้ แต่ในระบบที่มีฮาร์โมนิกส์ปนอยู่ค่าทั้งสองนี้จะไม่เท่ากัน

โดย

PF คือ อัตราส่วนของกำลังงานจริงต่อกำลังงานปรากฏ ดังสมการ (4-7)

DPF คือ อัตราส่วนของกำลังงานจริงต่อกำลังของรูปคลื่นความถี่หลักมูลต่อกำลังงานปรากฏของรูปคลื่นความถี่หลักมูล (4-8)

หรือคือค่า cosine ของมุมเฟสของแรงดันกับกระแสที่ความถี่หลักมูล

### 8. Crest factor

$$CF = \frac{I_{S_{peak}}}{I_S}$$

## 4.3 ผลกระทบของ ฮาร์โมนิกส์ ต่อ mmf

ในส่วนนี้เราจะกล่าวถึง ฮาร์โมนิกส์ ลำดับต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำจะสร้าง mmf waveforms ในลักษณะใดบ้างและมีผลอย่างไร

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{จาก } \text{mmf} = Ni$$

(4-9)

และในมอเตอร์เฟสขั้วนำ 3 เฟส

$$I_a = I_m \sin \omega t$$

(4-10)

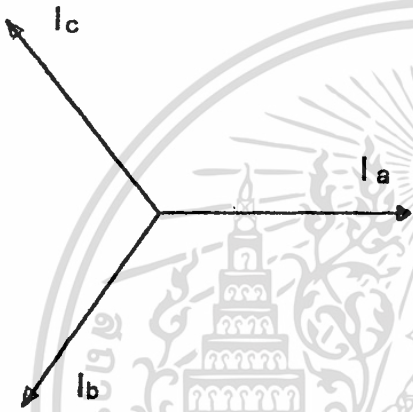
$$I_b = I_m \sin (\omega t - 120^\circ)$$

(4-11)

$$I_c = I_m \sin (\omega t - 240^\circ)$$

(4-12)

จะเขียน เฟสเซอร์ไดอะแกรม ได้ดังรูป



รูปที่ 4-1 (a) เฟสเซอร์ไดอะแกรม ขององค์ประกอบมูลฐาน

ใช้ฟูเรียร์วิเคราะห์จะได้

$$I_a = I_{1m} \sin \omega t + I_{3m} \sin 3\omega t + I_{5m} \sin 5\omega t + I_{7m} \sin 7\omega t + \dots \quad (4-13)$$

$$I_b = I_{1m} \sin (\omega t - 120^\circ) + I_{3m} \sin (3\omega t - 120^\circ) + I_{5m} \sin (5\omega t - 120^\circ) + I_{7m} \sin (7\omega t - 120^\circ) + \dots \quad (4-14)$$

$$I_c = I_{1m} \sin (\omega t - 240^\circ) + I_{3m} \sin (3\omega t - 240^\circ) + I_{5m} \sin (5\omega t - 240^\circ) + I_{7m} \sin (7\omega t - 240^\circ) + \dots \quad (4-15)$$

จัดรูปใหม่จะได้

$$I_a = I_{1m} \sin \omega t + I_{3m} \sin 3\omega t + I_{5m} \sin 5\omega t + I_{7m} \sin 7\omega t + \dots \quad (4-16)$$

$$I_b = I_{1m} \sin (\omega t - 120^\circ) + I_{3m} \sin (3\omega t - 360^\circ) + I_{5m} \sin (5\omega t - 240^\circ) + I_{7m} \sin (7\omega t - 120^\circ) + \dots \quad (4-17)$$

$$I_c = I_{1m} \sin (\omega t - 240^\circ) + I_{3m} \sin (3\omega t - 360^\circ) + I_{5m} \sin (5\omega t - 120^\circ) + I_{7m} \sin (7\omega t - 240^\circ) + \dots \quad (4-18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

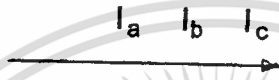
วิเคราะห์จาก ฮาร์โมนิกส์ ที่ 3

$$I_{a3} = I_{3m} \sin 3\omega t \quad (4-19)$$

$$I_{b3} = I_{3m} \sin (3\omega t - 360^\circ) \quad (4-20)$$

$$I_{c3} = I_{3m} \sin (3\omega t - 360^\circ) \quad (4-21)$$

เขียน เฟสเซอร์ไดอะแกรม ได้ดังรูป



รูปที่ 4-1 (b) เฟสเซอร์ไดอะแกรม ของ  $I_a, I_b, I_c$  ฮาร์โมนิกส์ที่ 3

ซึ่งจะพบว่า ฮาร์โมนิกส์ ที่  $(6n - 3)$  หรือ  $3, 9, \dots$  จะไม่มีผลต่อ mmf waveforms แต่จะทำให้เกิดกระแสไหลวน เรียกว่า ลำดับศูนย์ (Zero Sequence)

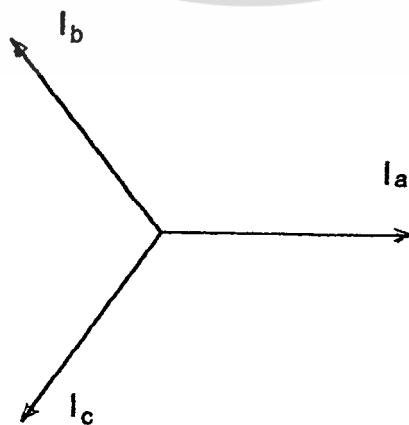
วิเคราะห์จาก ฮาร์โมนิกส์ ที่ 5

$$I_{a5} = I_{5m} \sin 5\omega t \quad (4-22)$$

$$I_{b5} = I_{5m} \sin (5\omega t - 240^\circ) \quad (4-23)$$

$$I_{c5} = I_{5m} \sin (5\omega t - 120^\circ) \quad (4-24)$$

เขียน เฟสเซอร์ไดอะแกรม ได้ดังรูป



รูปที่ 4-1 (c) เฟสเซอร์ไดอะแกรม ของฮาร์โมนิกส์ ที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะพบว่า ฮาร์โมนิกส์ ที่  $(6n - 1)$  หรือ  $5, 11, \dots$  จะสร้าง mmf ในลักษณะที่ หักล้างกันกับ ส่วน ขององค์ประกอบมูลฐาน เรียกว่าลำดับลบ(Negative Sequence)

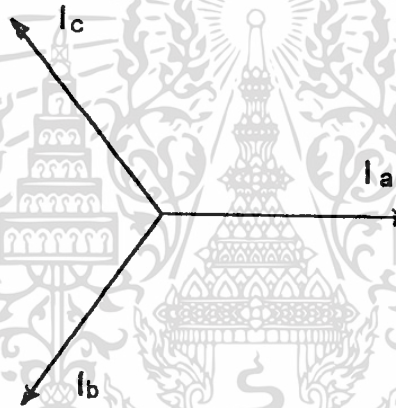
วิเคราะห์จาก ฮาร์โมนิกส์ ที่ 7

$$I_{a7} = I_{7m} \sin 7\omega t \quad (4-25)$$

$$I_{b7} = I_{7m} \sin (7\omega t - 120^\circ) \quad (4-26)$$

$$I_{c7} = I_{7m} \sin (7\omega t - 240^\circ) \quad (4-27)$$

เขียน เฟสเซอร์ไดอะแกรม ได้ดังรูป



รูปที่ 4-1 (d) เฟสเซอร์ไดอะแกรม ของ ฮาร์โมนิกส์ที่ 7

ซึ่งจะพบว่า ฮาร์โมนิกส์ ลำดับที่  $(6n + 1)$  หรือ  $7, 13, \dots$  จะสร้าง mmf waveforms ที่เสริมกัน กับส่วนขององค์ประกอบมูลฐาน เรียกว่าลำดับบวก( Positive Sequence)

#### 4-4 วงจรสมมูลของมอเตอร์ของฮาร์โมนิกส์

จากวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเดิม ในรูป 2.12 จะได้

$$S_1 = (1/n_1)(n_1 - n) \quad (4-28)$$

องค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ที่  $k^{\text{th}}$  ในกระแสเฟส จะผลิตคลื่นโทมฮาร์โมนิกส์ mmf หมุนตามหรือสวนทางที่ความเร็ว  $kn_1$  สลลพของโรเตอร์ในทิศทางสนามฮาร์โมนิกส์หมุนตามจะเป็น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S_k = (1/kn_1)(kn_1 + n) \quad (4-29)$$

และสนามฮาร์โมนิกส์หมุนวนจะเป็น

$$S_k = (1/kn_1)(kn_1 + n) \quad (4-30)$$

ดังนั้นเขียนเป็นรูปทั่วไป

$$S_k = (1/kn_1)(kn_1 \pm n) \quad (4-31)$$

เมื่อเครื่องหมายลบใช้สำหรับฮาร์โมนิกส์ลำดับบวกและเครื่องหมายบวกใช้แทนฮาร์โมนิกส์ลบ ฮาร์โมนิกส์สถิต  $S_k$  จะเขียนในเทอมของ  $S_1$  โดยแทนค่า  $n$  จาก 4-31 จะได้ ฮาร์โมนิกส์ลำดับบวกจะเป็น

$$S_k = (1/k)(k-1) + S_1 \quad (4-32)$$

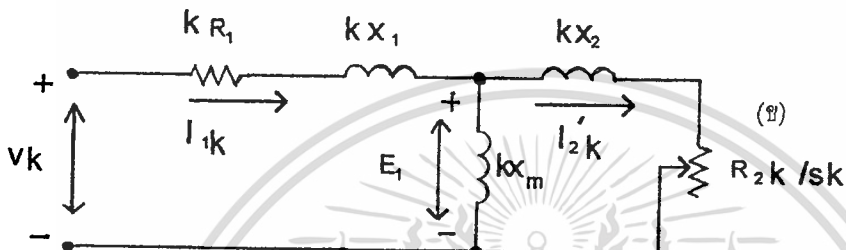
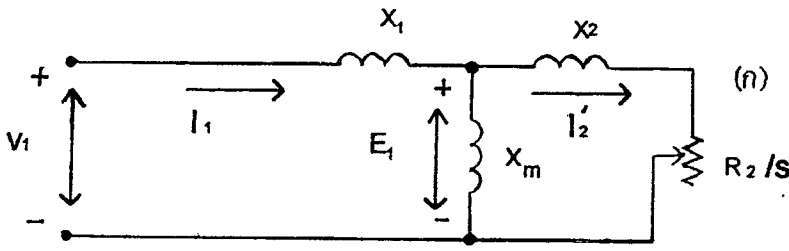
ฮาร์โมนิกส์ลำดับลบจะเป็น

$$S_k = (1/k)(k+1) - S_1$$

โดยที่

- |       |   |                                          |
|-------|---|------------------------------------------|
| $S_k$ | : | ค่าสถิตที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ $k$ |
| $k$   | : | ลำดับฮาร์โมนิกส์                         |
| $S_1$ | : | ค่าสถิตที่ความถี่พันทวน                  |

จากสมการนี้จะเห็นได้ว่า ค่าสถิตลำดับที่  $k$  จะไม่เท่ากัน โดยจะมีค่าสถิตต่าง ๆ กันตามสมการ ที่ 4-32 และ 4-33



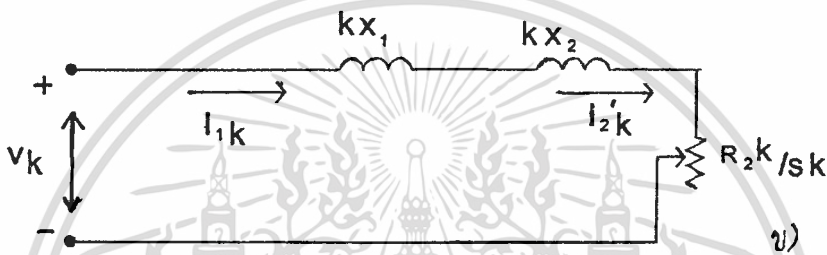
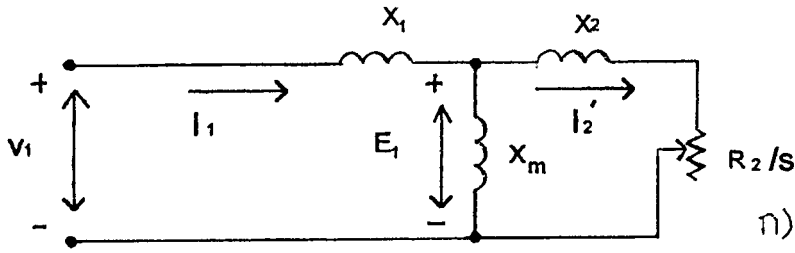
รูปที่ 4-2 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ก) วงจรสมมูลที่ความถี่ประกอบมูลฐาน

ข) วงจรสมมูลที่ไทม์ฮาร์โมนิกส์ที่  $k^{\text{th}}$

วงจรสมมูลสำหรับองค์ประกอบมูลฐานในรูป 4-2 ก สามารถนำไปใช้กับฮาร์โมนิกส์ของแรงดัน และกระแสฮาร์โมนิกส์ที่  $k$  ดังรูปที่ 4-2 ข ฮาร์โมนิกส์สลิป  $S_k$  จะนำไปแทนสลิปองค์ประกอบมูลฐาน  $S_1$  และรีแอกแตนซ์ของความเหนี่ยวนำทั้งหมด จะเพิ่มขึ้นด้วยแฟกเตอร์  $k$  ความต้านทานที่สเตเตอร์และโรเตอร์จะมีค่ามากขึ้น เนื่องจากสกินเอฟเฟกต์ (Skin effect) ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ ค่าที่เปลี่ยนไปนี้จะต้องนำไปพิจารณาด้วย เมื่อต้องการคำนวณให้ได้ความละเอียดสูง

จากสมการ 4-31 จะตรวจสอบได้ว่า  $S_k$  มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ขณะที่มอเตอร์ทำงานตามปกติถ้าหากว่ามอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วจากความเร็วซิงโครนัส (Synchronous speed) จนกระทั่งหยุดนิ่ง สลิปองค์ประกอบมูลฐานจะแปรจาก 0 ถึง 1 แต่สลิปของฮาร์โมนิกส์ที่ 5,  $S_5$  จะแปรจาก 1.2 ถึง 1 ทำนองเดียวกัน  $S_7$  จะแปรจาก 0.857 ถึง 1 และที่ความถี่สูง ๆ  $S_k$  จะเข้าใกล้ 1 มาวงจรสมมูลของฮาร์โมนิกส์ของรูป 4-2 (ข) สามารถลดลงมาเป็นในรูป 4-3 (ก) โดยการตัดเอาความต้านทานออกไป โดยอาศัยหลักความจริงว่า ค่ารีแอกแตนซ์ของความเหนี่ยวนำ จะเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นกับความถี่ ขณะที่อัตราการเพิ่มขึ้นของความต้านทานโรเตอร์ กับความถี่เนื่องจากสกินเอฟเฟกต์ จะมีค่าต่ำกว่าเชิงเส้น เนื่องจาก  $S_k$  มีค่าประมาณเท่ากับ 1 ความต้านทานในวงจรจึงสามารถละทิ้งได้ เมื่อเทียบกับ ค่ารีแอกแตนซ์ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ การลดรูปต่อไปจะทำได้ดังรูปที่ 4-3 (ข) เพราะว่า รีแอกแตนซ์ของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก มีค่าสูงกว่ารีแอกแตนซ์รั่วซึม และสามารถตัดออกได้ ดังนั้นอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์ที่เกิดจากกระแสฮาร์โมนิกส์ จะมีค่าประมาณ  $k(X_1 + X_2)$



รูปที่ 4-3 วงจรสมมูลอย่างประมาณสำหรับคำนวณหากระแสฮาร์โมนิกส์

กระแสฮาร์โมนิกส์ ที่สเตเตอร์ที่มีลำดับศูนย์จะมีเฟสที่ตรงกัน ทำให้ไม่มีกระแสไหล ด้วยเหตุนี้ จึงไม่ผลิตองค์ประกอบมูลฐาน mmf หมุนขึ้นมา อย่างไรก็ตาม ฮาร์โมนิกส์ลำดับศูนย์ก็อาจจะสร้าง คลื่นสเปซฮาร์โมนิกส์ mmf เล็กน้อยในช่องอากาศ และแต่ละระลอกของคลื่นสามารถกระจายเข้ากับรูป คลื่นตาม และย้อนได้คลื่นฟลักซ์เหล่านี้ จะเหนี่ยวนำกระแสฮาร์โมนิกส์ในโรเตอร์ที่กำลังหมุน ดังนั้น กระแสสเตเตอร์ลำดับศูนย์ จึงสามารถทำให้เกิดผล ต่อแรงบิดของมอเตอร์ได้

รีแอกแตนซ์ที่เกิดขึ้นที่ทำให้ฮาร์โมนิกส์ลำดับศูนย์ที่  $k$  ไหลจะมีค่า  $kX_0$  ถ้า  $X_0$  มีค่าน้อยและแรงดันที่ป้อนให้ มีค่าองค์ประกอบของกระแสลำดับศูนย์มาก กระแสลำดับศูนย์จะทำให้เกิดการสูญเสียที่ ขดลวดสเตเตอร์มาก ทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ลดลง อย่างไรก็ตาม กระแสลำดับศูนย์ จะไหลได้ เฉพาะมอเตอร์ ที่ต่อแบบ Y มีสายนิวทรัล ต่อระหว่าง แหล่งจ่ายกับโหลด มิฉะนั้นแล้ว จะไม่มีทาง ไหลกลับของกระแสลำดับศูนย์ ในทางปฏิบัติแล้ววงจรอินเวอร์เตอร์ทั่วไปจะไม่กำเนิดแรงดันลำดับ ศูนย์ แต่ถ้ามียอมักประกอบเหล่านี้เกิดขึ้นมาก็แก้ปัญหา โดยทำให้ิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์มีค่าเป็นอนันต์ โดยการตัดสายนิวทรัลออกไป

ในการวิเคราะห์การทำงานของมอเตอร์ ที่ความถี่ต่ำมาก ๆ การประมาณวงจรมูลฮาร์โมนิกส์ ในรูปที่ 4-3 จะใช้ไม่ได้ เพราะว่าการต้านทานของขดลวด จะเป็นแฟกเตอร์ที่สำคัญที่ความถี่ ฮาร์โมนิกส์ต่ำ ๆ อย่างไรก็ตามการลดรูปนี้จะยอมรับได้ ถ้าความถี่ขององค์ประกอบมูลฐานมากกว่า 10 Hz

#### 4-5 กระแสฮาร์โมนิกส์

เนื่องจาก  $S_k$  มีค่าใกล้เคียง 1 มากที่ทุก ๆ ความเร็วรอบมอเตอร์จะหาค่าหนึ่ง วงจรมูลของฮาร์โมนิกส์ ในรูปที่ 4-2 ข จึงเป็นอิสระจากความเร็วยรอบของมอเตอร์ เมื่อมอเตอร์ถูกป้อนด้วยอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันด้วยรูปคลื่นซ้ำเพาอย่างที่มีความถี่หนึ่ง กระแสฮาร์โมนิกส์จะยังคงมีค่าคงที่ตลอดเงื่อนไขการทำงานของมอเตอร์ จากไม่มีโหลดจนถึงมีโหลดเต็มพิกัด และลดความเร็วลงจนหยุดนิ่ง กระแสองค์ประกอบมูลฐานที่สเตเตอร์จะคำนวณได้จากโหลดของมอเตอร์ และด้วยเหตุนี้องค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ที่สัมพันธ์กับกระแสของเครื่องกล จึงมีค่าสูงขณะทำงานมีโหลดต่ำกว่าขณะที่ทำงานเต็มพิกัด องค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ที่มากกว่านี้จะทำให้การสูญเสียที่เครื่องกลขณะไม่มีโหลดมีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานกับรูปไซน์ปกติ

วงจรมูลอย่างประมาณในรูปที่ 4-3 ข จะมีลักษณะเดียวกับที่ใช้คำนวณกับคลื่นไซน์ปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะลอคโรเตอร์ เมื่อกระแสของมอเตอร์ถูกจำกัดไว้โดยรีแอคแตนซ์รั่วซึม ( $X_1 + X_2$ ) ดังนั้นขณะหยุดนิ่งหรือพฤติกรรมขณะสตาร์ทของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้แหล่งจ่ายรูปไซน์ ก็เป็นการวัดสมรรถนะเชิงฮาร์โมนิกส์ (Harmonic performance) ของมอเตอร์ ถ้ามอเตอร์ใช้กระแสสตาร์ทสูงมันจะใช้กระแสฮาร์โมนิกส์จากแหล่งจ่ายแรงดันที่ไม่ใช่ไซน์สูงด้วยเช่นกัน ถ้ามอเตอร์มีค่ารีแอคแตนซ์รั่วซึมต่ำ ควรจะระมัดระวังเมื่อนำไปใช้กับแรงดันที่ไม่ใช่ไซน์เพราะจะทำให้กระแสฮาร์โมนิกส์มีค่าสูงเกิน อาจจะทำให้มอเตอร์มีความร้อนเกินได้

กระแสฮาร์โมนิกส์ที่สเตเตอร์ จะคำนวณได้จาก

$$I_k = V_k / Z_k$$

วงจรมูลโดยประมาณในรูปที่ 4-3 ข จะยอมรับได้และ  $Z_k = (kX_1 + X_2)$  ดังนั้น

$$I_k = V_k / (kX_1 + X_2) \quad (4-34)$$

สำหรับฮาร์โมนิกส์ลำดับศูนย์  $Z_k = kX_0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_k = V_k / kX_0$$

(4-35)

สูตรเหล่านี้จะทำให้การคำนวณกระแสฮาร์โมนิกส์ทำได้เร็ว เนื่องจากรูปคลื่นแรงดันที่ไม่ใช่ไซน์มีองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ที่รู้ค่า ปกติแล้วจะไม่มีฮาร์โมนิกส์ที่สำคัญและไม่มีฮาร์โมนิกส์คู่ ดังนั้น ค่า rms ของกระแสฮาร์โมนิกส์จะเป็น

$$I_{har} = [I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2 + \dots + I_k^2 + \dots]^{1/2}$$

$$= \left[ \sum_{k=1}^{\infty} I_k^2 \right]^{1/2} \quad (4-36)$$

ค่า rms ของกระแสเตเตอร์ทั้งหมดรวมทั้งกระแสของประกอบมูลฐานจะเป็น

$$I_{rms} = [I_1^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2 + \dots + I_k^2 + \dots]^{1/2}$$

$$= [I_1^2 + I_{har}^2]^{1/2} \quad (4-37)$$

#### 4-6 การสูญเสียที่มอเตอร์เมื่อใช้กับแหล่งจ่ายที่ไม่ใช่รูปไซน์

แรงดัน PWM ที่เหมาะสมจะช่วยลดการสูญเสียที่ตัวมอเตอร์เนื่องจากฮาร์โมนิกส์ได้ แต่การเลือกวิธีมอดูเลตโดยไม่ระวัง ก็จะทำให้เกิดการสูญเสียเพิ่มขึ้นได้ การสูญเสียที่มอเตอร์ มีดังนี้

##### 4.6.1 การสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์

กระแสฮาร์โมนิกส์ที่ไหลในขดลวดสเตเตอร์จะทำให้การสูญเสีย  $I^2R$  เพิ่มขึ้น เมื่อไม่คิดสกินเอฟเฟค การสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์เมื่อป้อนแหล่งจ่ายที่ไม่ใช่รูปคลื่นไซน์ จะเป็นสัดส่วนกับค่ายกกำลังสองของกระแส rms การสูญเสียที่ขดลวดที่สเตเตอร์โดยรวมจะมีค่าดังนี้

$$P_1 = m_1 I_{rms}^2 R_1 \quad (4-38)$$

\* แทนค่า  $I_{rms}$  จากสมการ (4.37) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$P_1 = m_1 (I_1^2 + I_{har}^2) R_1 \quad (4-39)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งนั้น ยินยอมให้มีการเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการแก้ไข

เมื่อเทอมที่สองแทนการสูญเสียที่ขดลวดเนื่องจากฮาร์โมนิกส์ จากการทดลองพบว่าการเกิดขึ้นของกระแสฮาร์โมนิกส์จะมีผลให้เทอมขององค์ประกอบมูลฐานเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากกระแสสร้างสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น ผลดังกล่าวนี้จะทำให้มีการอ้อมตัวของทางเดินของฟลักซ์รั่วซึม (leakage flux) ของกระแสฮาร์โมนิกส์ในขณะนั้นเพิ่มขึ้น

#### 4-6-2 การสูญเสียที่ขดลวดที่โรเตอร์

สมมติฐานที่ว่าค่าความต้านทานคงที่ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ใดๆนั้น เป็นเหตุผลที่ยอมรับได้สำหรับขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกลแบบลวดพัน (Wire - Wound Machine) สำหรับมอเตอร์ไฟสลัขนาดใหญ่แล้วความต้านทานจะเพิ่มขึ้นพร้อมกับความถี่ ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่าง, ขนาด, และการวางตำแหน่งของตัวนำในสล็อตของสเตเตอร์อย่างไรก็ตามสกินเอฟเฟก ก็จะมีผลอย่างมากต่อโรเตอร์แบบกรงกระรอก (Cage rotor) ซึ่งจะทำให้ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นอย่างมากตามความถี่ฮาร์โมนิกส์

เนื่องจากความต้านทานของโรเตอร์เป็นฟังก์ชันของความถี่ฮาร์โมนิกส์ การสูญเสียที่ลวดทองแดงของโรเตอร์จะคำนวณแยกกันในแต่ละฮาร์โมนิกส์ โดยทั่วไปที่ฮาร์โมนิกส์ที่  $k$  การสูญเสียที่ขดลวดทองแดงของโรเตอร์จะมีค่าเป็น

$$P_{2k} = m_1 (I_{2k})^2 R_{2k} \quad (4-40)$$

ผลของสกินเอฟเฟกจะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำรั่วซึมของโรเตอร์ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ค่าความเหนี่ยวนำรั่วซึมโดยรวมของมอเตอร์ที่ความถี่สูง โดยปกติจะมีค่าประมาณ 80 หรือ 90 เปอร์เซ็นต์ของค่าตามพิกัดความถี่ การสูญเสียที่ขดลวดทองแดงเนื่องจากฮาร์โมนิกส์โดยรวมแล้วจะหาได้จาก ผลรวมของการสูญเสียที่เกิดจากแต่ละฮาร์โมนิกส์ ในมอเตอร์เหนี่ยวนำทั่วไป การสูญเสียที่ขดลวดทองแดงที่โรเตอร์ที่เพิ่มขึ้นมา เนื่องจากกระแสฮาร์โมนิกส์เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ลดประสิทธิภาพลงเมื่อใช้กับแหล่งจ่ายที่ไม่ใช่รูปไซน์

#### 4-6-3 การสูญเสียที่แกนเหล็กเนื่องจากฮาร์โมนิกส์

การสูญเสียแกนเหล็กในเครื่องกลไฟฟ้า จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากฮาร์โมนิกส์ที่ป้อนมาในแหล่งจ่ายแรงดันและกระแสเช่นเดียวกับ ดังที่ได้อธิบายมาแล้วว่ารูปคลื่น  $m m f$  ของไทม์ฮาร์โมนิกส์จะเกิดขึ้นในช่องอากาศจากแต่ละกระแสฮาร์โมนิกส์ในสเตเตอร์ รูปคลื่น  $m m f$  ของไทม์ฮาร์โมนิกส์เหล่านี้ จะหมุนตามหรือสวนทางที่ความเร็ว เป็นจำนวนเท่าของความเร็วองค์ประกอบมูลฐาน อย่างไรก็ตามผลของ

ฟลักซ์ที่ช่องอากาศซึ่งเกิดจากไทม์ฮาร์โมนิกส์ มีค่าน้อยมากสามารถละทิ้งการเพิ่มขึ้นของการสูญเสียที่แกนเหล็กได้

การสูญเสียเนื่องจากฟลักซ์ที่ช่องอากาศ อันเนื่องมาจากสเปซฮาร์โมนิกส์ก็ละทิ้งได้เช่นกันแต่ ฟลักซ์รั่วซึมที่ปลายตัวนำ (End-leakage flux) และฟลักซ์รั่วซึมจากการวางตัวนำเอียง (Skew-leakage flux) ซึ่งปกติจะทำให้เกิดการสูญเสียสตรีกโหลด (Stray load) อาจจะทำให้เกิดการสูญเสียที่แกนเหล็กที่เห็นผลได้กับความถี่ฮาร์โมนิกส์ ด้วยเหตุนี้ผลต่าง ๆ เหล่านี้จะต้องนำไปพิจารณาพร้อมกับมอเตอร์ที่ทำงาน ด้วยแหล่งจ่ายที่ไม่ใช่รูปคลื่นไซน์ การสูญเสียจากฟลักซ์รั่วซึมที่ปลายตัวนำเป็นการสูญเสียแบบกระแสไหลวน (Eddy current) ในแผ่นลามิเนต (laminates) เนื่องจากฟลักซ์รั่วซึมที่ด้านปลายขดลวดซึ่งอยู่ในแผ่นลามิเนตในทิศทางตั้งฉากผลของการรั่วซึมที่ปลายจะปรากฏในทั้งขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์

#### 4-7 ฮาร์โมนิกส์ของแรงบิด

รูปคลื่น mmf ของไทม์ฮาร์โมนิกส์ในช่องอากาศ จะยังผลให้ฮาร์โมนิกส์ของแรงบิดเพิ่มขึ้นในโรเตอร์แรงบิดนี้แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ก) ฮาร์โมนิกส์ของแรงบิดในสถานะสงบนิ่งและ ข) ระเบิดฮาร์โมนิกส์ของแรงบิด

##### 4-7-1 ฮาร์โมนิกส์ของแรงบิดในสถานะสงบนิ่ง

แรงบิดคงที่หรือแรงบิดสถานะสงบนิ่งจะถูกสร้างขึ้นมา โดยปฏิกิริยาของฮาร์โมนิกส์ของ mmf ที่โรเตอร์ หรือกระแสที่อันดับเดียวกัน อย่างไรก็ตามฮาร์โมนิกส์ของแรงบิดในภาวะสงบนิ่งเหล่านี้จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับพิคตแรงบิด สามารถละทิ้งผลที่มีต่อการทำงานของมอเตอร์ได้ ซึ่งจะตรวจสอบได้โดยการคำนวณแรงบิด โดยใช้วงจรสมมูลของฮาร์โมนิกส์เข้าช่วยแรงบิดขององค์ประกอบมูลฐานจะคำนวณได้จากวงจรสมมูลขององค์ประกอบมูลฐาน ดังนี้

$$T_1 = (1 / 2\pi f_1) (I_2)^2 R_2 / S_1 \quad (4-41)$$

ในทำนองเดียวกันฮาร์โมนิกส์ของแรงบิดอันดับที่  $k^{\text{th}}$ ,  $T_k$  ก็สามารถคำนวณได้จากวงจรสมมูลของรูปที่ 4-2 ข) ดังนี้

$$T_k = \pm (1/2\pi f_1) (I_k)^2 R_k / S_k \quad (4-42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแรงบิดตาม (Forward torque) เนื่องจากฮาร์โมนิกส์ลำดับบวกแทนด้วยบวกและแรงบิดสวนกลับ (Reverse torque) เนื่องจากฮาร์โมนิกส์ลำดับลบ แทนด้วยเครื่องหมายลบ

สลีปขององค์ประกอบมูลฐาน  $S_1$  จะมีค่าน้อยที่ถ้าทำงานเต็มพิกัดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ดังนั้นสมการ (4-36) สำหรับสลีปของฮาร์โมนิกส์จะเป็น

$$S_k = (k \pm 1) / k \quad (4-43)$$

แทนในสมการ(4-42)

$$T_1 = \pm (1 / 2\pi f_1) P_{m_1} (L_k)^2 R_k / [(k \pm 1) / k] \quad (4-44)$$

เมื่อรวมผลฮาร์โมนิกส์ของแรงบิดจากแหล่งจ่ายทั้งหมดเข้าด้วยกันแล้ว ผลของฮาร์โมนิกส์ของแรงบิดภาวะสงบนิ่งอันดับที่ 5 และอันดับที่ 7 จะมีทิศทางตรงกันข้ามกันจึงทำให้แรงบิดลัพธ์ขนาดเล็ก และมีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงบิดของมอเตอร์จากองค์ประกอบมูลฐาน ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 11 และ 13 ก็จะมีลักษณะทำนองเดียวกัน จึงทำให้ผลโดยรวมของฮาร์โมนิกส์ของแหล่งจ่ายสามารถละทิ้งไปได้

#### 4-7-2 ระลอกฮาร์โมนิกส์ของแรงบิด

องค์ประกอบกระแสเฟืองของแรงบิดจะเกิดจากปฏิกริยาของฮาร์โมนิกส์จาก mmf ที่โรเตอร์กับฮาร์โมนิกส์จากการหมุนของฟลักซ์ที่ต่างอันดับกัน ดังที่แสดงให้เห็นแล้วว่าฮาร์โมนิกส์จากฟลักซ์ที่ช่องอากาศนั้นมีค่าน้อย และการกระเฟืองของแรงบิดที่เด่นชัดจะเกิดจากการกระทำร่วมกันระหว่างฮาร์โมนิกส์จากกระแสโรเตอร์ หรือ mmf และการหมุนของฟลักซ์องค์ประกอบมูลฐานตัวอย่างเช่น ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5 จากกระแสสเตเตอร์ จะทำให้เกิดระบบที่มีลำดับเป็นลบและสร้างรูปคลื่น mmf องค์ประกอบมูลฐานที่หมุนเป็น 5 เท่าของความเร็วเชิงโคจรขององค์ประกอบมูลฐาน ในทิศทางตรงกันข้ามกับสนามแม่เหล็กขององค์ประกอบมูลฐาน กระแสโรเตอร์ที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นมาโดยสนามแม่เหล็กจากโทมฮาร์โมนิกส์นี้ต้านกับสนามแม่เหล็กหมุนขององค์ประกอบมูลฐาน ทำให้เกิดการกระเฟืองของแรงบิดเป็น 6 เท่า ของความถี่องค์ประกอบมูลฐานเพราะว่า ความเร็วรอบสัมพัทธ์ของรูปคลื่น mmf ของโรเตอร์และ องค์ประกอบมูลฐานของสนามแม่เหล็กที่ช่องอากาศจะเป็น 6 เท่า ของความเร็วเชิงโคจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ฮาร์โมนิกส์ที่ 7 ของกระแสสเตเตอร์ก็จะสร้างระลอกแรงบิดเป็น 6 เท่า ของความถี่องค์ประกอบมูลฐานเช่นกัน แต่ฮาร์โมนิกส์หมุนเป็น 7 เท่าของความเร็วเชิงโคจรในทิศทางเดียวกันสนาม

แม่เหล็กขององค์ประกอบมูลฐานความเร็วสัมพัทธ์ของสนามแม่เหล็กที่ช่องอากาศและฮาร์โมนิกส์ mmf ที่ โรเตอร์จะเป็น 6 เท่า ของความเร็วซิงโครไนส์และระลอกของแรงบิดทั้งสองที่เป็น 6 เท่าของความถี่ องค์ประกอบมูลฐานจะรวมกันสร้างการกระเพื่อมขึ้นในแรงบิดที่เกิดจากแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic torque) ที่สร้างขึ้นโดยมอเตอร์ ทำนองเดียวกันฮาร์โมนิกส์ที่ 11 และ 13 จะสร้างฮาร์โมนิกส์ที่ 12 ของระลอกแรงบิด

ระลอกแรงบิดจะมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ แต่จะทำให้ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์แปรไปในช่วงการหมุนที่ความเร็วรอบต่ำมาก ๆ การหมุนของมอเตอร์จะเป็นแบบตะกุกตะกัก หรือเป็นขั้น ๆ และการทำงานในย่านความเร็วรอบต่ำ ๆ จะต้องทำให้รูปคลื่นเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์มีคุณภาพดีขึ้น โดยกำจัดฮาร์โมนิกส์อันดับต่ำ ๆ ออกไป

แรงบิดองค์ประกอบมูลฐานสามารถเขียนได้ ดังนี้

$$T = K \phi_1 I_1 \cos \delta_1$$

ในรูปแบบต่อหน่วยสมการของแรงบิดองค์ประกอบมูลฐานจะเป็น

$$T = K \phi_1 I_2 \cos \delta_2$$

ในทำนองเดียวกันรูปแบบต่อหน่วยจะเป็น

$$T = K \phi_1 I_2 \sin \delta_2$$

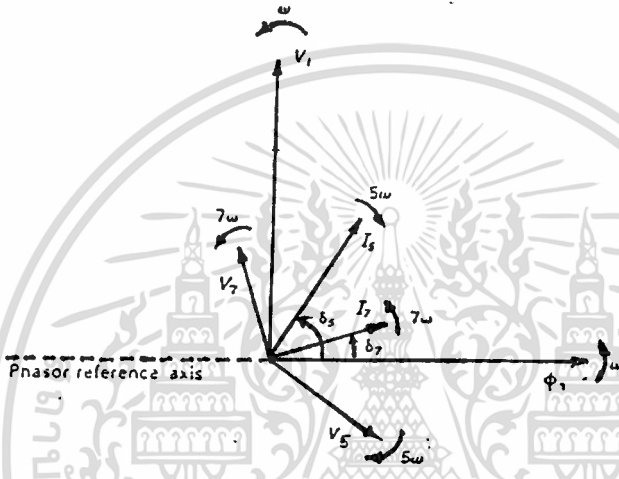
$$T = K \phi_1 I_1 \sin \delta_1$$

แรงบิดมอเตอร์ที่เป็นบวกจะเกิดขึ้นเมื่อกระแส  $I_1$  และ  $I_2$  นำหน้าฟลักซ์  $\phi_1$  เป็นมุมแรงบิด  $\delta_1$  และ  $\delta_2$  ตามลำดับ สมการเหล่านี้ สามารถนำไปใช้คำนวณหาแอมพลิจูดของระลอกแรงบิดได้เฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันและกระแสองค์ประกอบมูลฐาน, ฮาร์โมนิกส์ที่ 5, 7 เขียนได้ ดังในรูปที่ 444 โดยกำหนดให้  $\phi_1$  วางอยู่ในแกนอ้างอิงของเฟสเซอร์

สมมติว่า แรงดันองค์ประกอบมูลฐาน  $V_1$  มีเฟสตรงกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  $E_1$  ที่สเตเตอร์แล้วฟลักซ์  $\phi_1$  จะล้าหลัง  $V_1$  ไป 90 องศา เมื่อไม่คิดค่าความต้านทานของเครื่องกลที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์

และไม่คิดฮาร์โมนิกส์จากกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก เนื่องจากวงจรสมมูลของฮาร์โมนิกส์เป็นรีแอกติฟล้วน กระแสฮาร์โมนิกส์ที่สเตเตอร์จะล้าหลังแรงดันที่ฮาร์โมนิกส์เดียวกันเป็นมุม 90 องศา

จากรูปที่ 4-4 กระแสฮาร์โมนิกส์หรือ mmf,  $I_s$  จะนำหน้าฟลักซ์องค์ประกอบมูลฐาน  $\phi_1$  เป็นมุมแรงบิด  $\delta_s$  โดยเปรียบเทียบกับเฟสเซอร์ไดอะแกรมขององค์ประกอบมูลฐานคลื่นเหล่านี้ จะกระทำต่อกันเพื่อผลิตแรงบิดมอเตอร์ค่าบวก มีค่า



รูปที่ 4.4 เฟสเซอร์ไดอะแกรมที่รวมเอาองค์ประกอบมูลฐาน, ฮาร์โมนิกส์ที่ 5, 7 เข้าด้วยกัน

$$T = K \phi_1 I_s \cos \delta_s$$

เมื่อปริมาณทั้งหมดอยู่ในแบบต่อหน่วย

อย่างไรก็ตาม ภายหลังเวลา  $t$  มุม  $\delta_s$  จะลดลงด้วยอัตรา  $6\omega$  มุม  $\delta_s$  ในช่วงเริ่มต้นจะกลายเป็น  $(\delta_s - 6\omega t)$  ดังนั้น

$$T = K \phi_1 I_s \sin (\delta_s - 6\omega t) \quad (4-45)$$

ในทำนองเดียวกัน กระแสฮาร์โมนิกส์ที่ 7,  $I_7$  จะนำหน้าฟลักซ์องค์ประกอบมูลฐาน  $\phi_1$  ด้วยมุมแรงบิด  $\delta_7$  ซึ่งจะเพิ่มขึ้นด้วยอัตรา  $6\omega$  ดังนั้นจึงมีองค์ประกอบแรงบิดที่เป็นบวกเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  

$$T = K \phi_1 I_s \sin (\delta_7 + 6\omega t) \quad (4-46)$$
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่า แต่ละองค์ประกอบแรงบิด จะมีระลอกด้วยความถี่เชิงมุมเป็น  $6\omega$  และฮาร์โมนิกส์ที่ 6 ทั้งหมดของระลอกแรงบิดจะคำนวณได้โดยการรวมเข้าด้วยกัน ดังนั้น

$$\begin{aligned} T &= \phi_1 [I_5 \sin(\delta_5 - 6\omega t) + I_7 \sin(\delta_7 + 6\omega t)] \\ &= [(I_5 \sin \delta_5 + I_7 \sin \delta_7) \cos(6\omega t) - (I_5 \sin \delta_5 - I_7 \sin \delta_7) \sin(6\omega t)] \end{aligned} \quad (4-47)$$

ผลลัพธ์อาจเขียนอยู่ในรูป

$$T_6 = \phi_1 [I_5^2 + I_7^2 - 2 I_5 I_7 \cos(\delta_5 + \delta_7)]^{1/2} \cos(6\omega t + \beta) \quad (4-48)$$

เมื่อ

$$\tan \beta = (I_5 \cos \delta_5 - I_7 \cos \delta_7) / (I_5 \sin \delta_5 + I_7 \sin \delta_7)$$

ฮาร์โมนิกส์ที่ 6 ขององค์ประกอบแรงบิดที่เพิ่มขึ้นมาเกิดจากกิริยาร่วมกันของฮาร์โมนิกส์ที่ 5 และ 7 ของฟลักซ์ที่ช่องอากาศกับองค์ประกอบมูลฐานของ mmf ที่โรเตอร์ แต่ปกติแล้วจะมีค่าน้อยมาก แอมพลิจูดของระลอกแรงบิดฮาร์โมนิกส์ที่ 6 จะคำนวณได้จากสมการ 4-47 คือ

$$T_6 = \phi_1 [I_5^2 + I_7^2 - 2 I_5 I_7 \cos(\delta_5 + \delta_7)]^{1/2} \quad (4-49)$$

จากการวิเคราะห์ในทำนองเดียวกันนี้ จะได้แอมพลิจูดต่อหน่วยของแรงบิดฮาร์โมนิกส์ที่ 12 เนื่องจากกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ 11 และ 13 เป็น

$$T_{12} = \phi_1 [I_{11}^2 + I_{13}^2 - 2 I_{11} I_{13} \cos(\delta_{11} + \delta_{13})]^{1/2} \quad (4-50)$$

โดยทั่วไปแล้ว กระแสฮาร์โมนิกส์ที่มีอันดับ  $k = (6n - 1)$  และ  $(6n + 1)$  เมื่อ  $n$  เป็นจำนวนเต็มจะทำให้เกิดระลอกแรงบิดที่มีอันดับ  $6n$  ด้วยแอมพลิจูดเป็นค่าต่อหน่วยดังนี้

$$T_{6n} = \phi_1 [I_{6n-1}^2 + I_{6n+1}^2 - 2 I_{6n-1} I_{6n+1} \cos(\delta_{6n-1} + \delta_{6n+1})]^{1/2} \quad (4-51)$$

#### 4-8 การทำงานโดยให้ V/F ที่ขั้วมีค่าคงที่

สมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ในสภาวะสงบนิ่งจะวิเคราะห์โดยใช้วงจรสมมูลยอร์กต์ ประกอบมูลฐาน สำหรับการทำงานที่รูปคลื่นไซน์ปกติ โดยทั่วไปจะไม่คิด สกินเอฟเฟกต์ ดังนั้นความต้านทานจึงเป็นอิสระจากความถี่ ในขณะที่ค่ารีแอคแตนซ์จะมีค่าแปรอย่างเป็นสัดส่วนกับความถี่

ด้วยเหตุนี้จึงไม่คิดค่าการสูญเสียที่แกนเหล็ก ดังนั้นส่วนของวงจรแม่เหล็ก จึงประกอบด้วยรีแอคแตนซ์จากการสร้างสนามแม่เหล็ก ( $X_m$ ) อย่างเดียว การหมุนของรูปคลื่นฟลักซ์ในช่องอากาศจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (emf),  $E_1$  ขึ้นในขดลวดสเตเตอร์แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้จะน้อยกว่าแรงดันที่ป้อนให้มอเตอร์ เนื่องจากมีแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์รั่วซึม ( $R_1 + jX_1$ )  $I_1$  เพราะว่าการเคลื่อนที่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสเปซฮาร์โมนิกส์ไม่นำมาคิดการหมุนของฟลักซ์ จึงมีการกระจายเป็นรูปคลื่นไซน์ และการคล้อง (linking) ของฟลักซ์ในขดลวดสเตเตอร์แต่ละชุด มีการแปรผันตามเวลา ในลักษณะไซน์ ถ้า  $\phi$  ใช้แทนองค์ประกอบมูลฐานของฟลักซ์ต่อขั้วสนามแม่เหล็กหมุน การคล้องของฟลักซ์ชั่วขณะที่ขดลวดที่พันแบบเต็มระยะ (full span) จะเป็น

$$\phi = \phi_1 \sin \omega_1 t \quad (4-52)$$

เมื่อ  $\omega_1 = 2\pi f_1$  เป็นความถี่เชิงมุมของแหล่งจ่ายแรงดัน ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อรอบจะมีค่าเป็น

$$\begin{aligned} e_1 &= \frac{d\phi}{dt} \\ &= \omega_1 \phi_1 \cos \omega_1 t \end{aligned} \quad (4-53)$$

ค่า rms ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่สเตเตอร์จะคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} E_1 &= \frac{\omega_1 \phi_1 K_\omega N_1}{2} \\ &= 4.44 K_\omega f_1 N_1 \phi_1 \end{aligned} \quad (4-54)$$

ถ้า  $K_\omega$  มีค่าเป็น 1 แล้ว สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของหม้อแปลงทั่วไป ก็สามารถนำมาใช้ได้ สำหรับมอเตอร์หรือหม้อแปลง  $\phi_1$  จะเป็นสัดส่วนกับ  $E_1 / \omega_1$  หรือ  $E_1 / f_1$

เพื่อให้การนำไปใช้งานมีประสิทธิภาพ ฟลักซ์ที่ช่องอากาศของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะต้องรักษาให้มีค่าคงที่ทุกความถี่ ฟลักซ์ที่ช่องอากาศจะมีค่าคงที่เมื่ออัตราส่วน  $E_1 / f_1$  มีค่าคงที่ แต่ถ้าหากว่า แรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์รั่วซึมที่สเตเตอร์ มีค่าน้อยแล้ว  $V_1$  และ  $E_1$  จะมีค่าประมาณเท่ากัน ด้วยเหตุนี้ ฟลักซ์ที่ช่องอากาศจะค่าเกือบคงที่เมื่ออัตราส่วน  $V_1 / f_1$  มีค่าคงที่ นี่เป็นวิธีการทำงานในโหมดแรงดันต่ออัตราส่วนเป็นเอกลักษณ์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการรักษาให้  $V_1 / f_1$  เป็นค่าคงที่ เมื่อผู้ผลิตเห็นประโยชน์ของการใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ที่มีค่าคงที่ ซึ่งปกติจะใช้ในระบบรูปเปิด ข้อเสียก็คือ สมรรถนะของมอเตอร์จะต่ำลงที่ความถี่ต่ำ เมื่อฟลักซ์ที่ช่องอากาศลดลงเพราะว่ามีแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์รั่วซึม

#### 4-8-1 คุณสมบัติของแรงบิด

จากวงจรสมมูลขององค์ประกอบมูลฐาน จะเขียนสมการเฟสเซอร์ได้ดังนี้

$$V_1 = (R_1 + jx)I_1 + \left( \frac{R_2}{S + jx_2} \right) I_2 \quad (4-55)$$

$$jx_m = \left( \frac{R_2}{S + jx_2} \right) I_2 \quad (4-56)$$

$$T = \frac{(1/\omega_1) P_{m1} I_2^2 R_2}{S} \quad (4-57)$$

จากนิยาม  $S = (1/\omega_1)(\omega_1 - \omega_m)$  (4-58)

เมื่อ  $\omega_1$  และ  $\omega_m$  กำหนดให้มีหน่วยเดียวกัน เป็นเรเดียน / วินาที โดย  $\omega_1 = 2\pi f_1$  เป็นความถี่เชิงมุมของแหล่งจ่าย

ถ้า  $f_2$  เป็นความถี่ที่โรเตอร์ ซึ่งมีลักษณะเดียวกับความถี่ที่สเตเตอร์  $f_1$  แล้ว

$$\begin{aligned} S &= f_2 / f_1 \\ &= \omega_2 / \omega_1 \end{aligned} \quad (4-59)$$

เมื่อ  $\omega_2 = 2\pi f_2$

ผลต่างความเร็ว  $\omega_1 - \omega_m$  นั้นเรียกว่าความเร็วรอบสลีฟ จาก (4-58) และ (4-59) จะได้

$$\begin{aligned}\omega_1 - \omega_m &= \omega_2 \\ &= S \omega_1\end{aligned}\tag{4-60}$$

ดังนั้นความเร็วรอบสลีฟเป็นเรเดียน/วินาที จึงเท่ากับความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์  $\omega_2$

จากสมการ (4-56), (4-57), (4-58) และ (4-59) แรงบิดของมอเตอร์สามารถเขียนให้อยู่ในเทอมของแรงดัน  $V_1$  และความเร็วเชิงมุม  $\omega_1$  และ  $\omega_2$  ดังนี้

$$T = \frac{P_{m1} \left( V_1 / \omega_1 \right)^2 \omega_2 X_m^2}{\left[ R_2 \left( A^2 + B^2 \right) \right]}\tag{4-61}$$

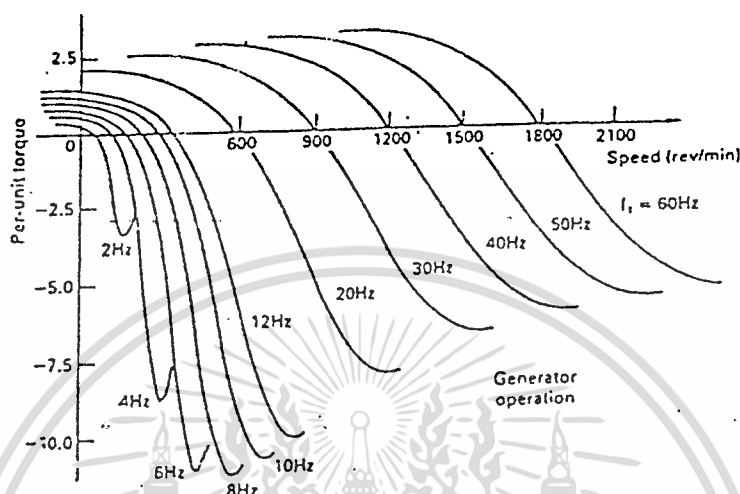
เมื่อ

$$\begin{aligned}A &= R_1 - \left( \frac{\omega_2^2}{\omega_1} \right) \left( X_{11} X_{22} - X_m^2 \right) \\ B &= X_{11} + \left( X_{11} + \omega_2 R_1 X_{22} / \omega_1 R_2 \right) \\ X_{11} &= X_1 + X_m \\ X_{22} &= X_2 + X_m\end{aligned}$$

ในรูปที่ 4-5 แสดงถึงคุณสมบัติของแรงบิด - ความเร็วรอบของการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ปรับความเร็วได้ จะพบความเร็วที่ต่ำกว่า 10 Hz นั้น แรงบิดสูงสุดจะลดลงอย่างมาก ทั้งนี้ เนื่องจากฟลักซ์ที่ช่องอากาศลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์รั่วซึม มีค่าสูงเมื่อเทียบกับแรงดันองค์ประกอบมูลฐาน ซึ่งไม่สามารถละทิ้งได้

ในช่วงที่เป็นเครื่องกำเนิดแบบเหนี่ยวนำ ตัวเครื่องกลจะทำงาน โดยให้กำลังงาน ไหลย้อนกลับ และมีแรงดันย้อนกลับตกคร่อมที่สเตเตอร์ มีผลให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  $E_1$  มีค่าสูงขึ้นและฟลักซ์ที่ช่องอากาศก็มีค่าสูงขึ้นด้วย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดแรงบิดของเครื่องกำเนิดอย่างมากอย่างไรก็ตาม คุณสมบัติในรูปที่ 4-5 จะใช้หลักการของวงจรสมมูลเชิงเส้น ซึ่งไม่เกิดการอิ่มตัวของแม่เหล็ก ในทางปฏิบัติแล้ว ผลของการอิ่มตัวนี้ จะทำให้แรงบิดการเบรคในช่วงเป็นเครื่องกำเนิด มีค่าน้อยกว่าทางทฤษฎี ที่แสดงไว้ในรูปที่ 4-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-5 คุณสมบัติของแรงบิด - ความเร็วรอบของการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ปรับความถี่ด้วย  
การให้อัตราส่วน  $V/F$  มีค่าคงที่

ในช่วงทำงานเป็นมอเตอร์ การอิมตัวจะไม่เกิดขึ้น โดยการควบคุมแบบแรงดันต่อความถี่คงที่ นั้น มีผลทำให้ฟลักซ์ในช่องอากาศมีค่าค่อนข้างจะคงที่ โดยจากรูปจะเห็นได้ว่า ในช่วงความถี่ต่ำ จะเห็นว่า มอเตอร์ไม่สามารถรับโหลดได้ตามพิกัดที่ต้องการ เนื่องจากฟลักซ์ของช่องอากาศในมอเตอร์ไม่คงที่ ซึ่งเป็นผลที่ไม่น่าพอใจนัก

จากรูปที่ 4.5 แสดงคุณสมบัติ ของแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ทำงานได้ในช่วงที่ เสถียร จะเห็นได้ว่ามีลักษณะเป็นกราฟแรงบิดและความเร็วรอบ โดยความถี่ที่เปลี่ยนไป จะเป็นตัว กำหนดความเร็วเชิงโคโรนัสใหม่ ซึ่งจะมีผลให้รับแรงบิดได้ต่ำลงเรื่อย ๆ และกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ ก็ จะเป็นไปตามทฤษฎี

จากสมการที่ (4.60) สามารถนำไปใช้คำนวณหาแรงบิดมอเตอร์ได้ แรงบิดเบรคดาวน์จะปรากฏ ที่ ความถี่โรเตอร์เฉพาะค่า เรียกว่า ความถี่เบรคดาวน์ โรเตอร์

โดยการดิฟเฟอเรนเชียล สมการที่ (4.61) เทียบกับ  $\omega_2$  และให้มีค่าเท่ากับศูนย์ ความถี่เบรค ดาวน์ที่โรเตอร์ จะเป็น

$$\omega_{2b} = \pm \omega_1 R_2 \{ (R_1^2 + X_{11}^2) / [(X_{11}X_{22} - X_m^2)^2 + R_1^2 X_{22}^2] \}^{1/2} \quad (4-62)$$

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น ก็ควรให้ค่าเป็นค่าบวกเสมอ และถ้าได้ค่าเป็นลบของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องหมอบวกและลบใช้แทน การทำงานเมื่อทำงานเป็นมอเตอร์ และเครื่องกำเนิดตามลำดับ ถ้า  $X_m$  มีค่ามากกว่า  $X_2$  และ  $X_2$  มาก ๆ แล้วสมการ (4.62) จะลดลงเป็น

$$\omega = \pm \omega_1 R_2 / [R_1^2 + (X_1 + X_2)^2]^{1/2} \quad (4-63)$$

แรงบิดเบรคดาว์สามารถคำนวณได้ด้วยการแทนค่า  $Q_{2s}$  แทน  $Q_2$  ในสมการ (4.61) แรงบิดเริ่มสตาร์ทได้โดยให้  $\omega_1$  เท่ากับ  $\omega_{2s}$  ในสมการ (4.62)

#### 4-9 การทำงานเมื่อฟลักซ์ที่ช่องอากาศคงที่

เพื่อให้แรงบิดมีค่าคงที่ตลอดค่าความเร็ว ฟลักซ์ที่ช่องอากาศควรรักษาให้มีค่าคงที่ และไม่ยอมให้ลดลงที่ค่าความถี่ต่ำ ค่าคงที่ทำได้ถ้าหากว่า emf ที่ช่องอากาศ  $E_1$  ไม่ใช่แรงดันที่ขั้ว  $V_1$  นั้นได้รับการปรับอย่างเป็นเชิงเส้นกับความถี่

ฟลักซ์ที่ช่องอากาศจะเป็นสัดส่วนกับ  $E_1 / \omega_1$  ดังนั้น จึงเป็นสัดส่วนกับผลคูณ  $L_m I_m$  จากสมการ (4-64) ถ้า  $L_m$  มีค่าคงที่ และไม่มีผลจากการอิ่มตัวฟลักซ์ที่ช่องอากาศจะเป็นสัดส่วนกับ  $I_m$  ฟลักซ์ที่ช่องอากาศที่คงที่ ต้องการกระแสสร้างสนามแม่เหล็กที่คงที่ตลอดช่วงความเร็ว และ โหลด ในทางปฏิบัติ  $I_m$  อาจจะรักษาให้มีค่าคงที่มีพิสัยตามลักษณะของการทำงานที่โหลดเต็มที่ปกติ ที่พิกัดแรงดัน และความถี่ นอกจากนี้  $I_m$  อาจจะมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย ตามลักษณะการทำงานขณะไม่มีโหลดที่พิกัดแรงดัน และความถี่

$$\begin{aligned} E_1 &= jX_m I_m \\ &= j\omega_1 L_m I_m \end{aligned} \quad (4-64)$$

นอกจากนี้ กระแสโรเตอร์  $I_2$  จะคำนวณได้จากสมการ

$$I_2 = E_1 / [(R_2/s)^2 + X_2^2]^{1/2} \quad (4-65)$$

$$I_2 = [E_1 / \omega_1] \omega_2 / [(R_2)^2 + (\omega_2 L_2)^2]^{1/2} \quad (4-66)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าฟลักซ์ช่องอากาศมีค่าคงที่ แล้ว  $E_1 / \omega_1$  จะมีค่าคงที่ และ กระแสโรเตอร์ จะเป็นฟังก์ชันของความถี่โรเตอร์  $\omega_2$  เท่านั้น และเป็นอิสระจากความถี่แหล่งจ่าย  $\omega_1$

#### 4-9-1 คุณสมบัติของแรงบิด

สมการที่ (4-66) สามารถแทนในสมการที่ (4-46) เพื่อให้ได้สมการบิดเป็นดังนี้

$$T = Pm_1 [E_1 / \omega_1]^2 \{ \omega_2 R_2^2 / [R_2^2 + (\omega_2 L_2)^2] \} \quad (4-67)$$

ในรูปที่ 4-6 แสดงคุณสมบัติ แรงบิด-ความเร็วรอบ สำหรับการทำงานที่ปรับความถี่ได้ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ซึ่งฟลักซ์ในช่องอากาศ มีการรักษาให้คงที่ ที่ค่าเดียวกับการทำงานขณะไม่มีโหลด ที่พิกัดแรงดัน และความถี่ จะเห็นว่า แรงบิดเบรคดาวน์ จะเป็นค่าเดียวกับที่ความถี่ แหล่งจ่ายทุก ๆ ค่า และมอเตอร์ จะมีความสามารถให้แรงบิดที่ตลอดเต็มช่วงความเร็ว จึงไม่เกิดปัญหาสมรรถนะตก ที่ความถี่ต่ำ ทำการคิฟเฟอเรนเชียล สมการ (4-67) เทียบกับ  $\omega_1$  และให้สมการมีค่าเท่ากับ ศูนย์จะได้ความถี่เบรคดาวน์ที่โรเตอร์เป็น

$$\omega_{2b} = \pm R_2 / L_2 \quad (4-68)$$

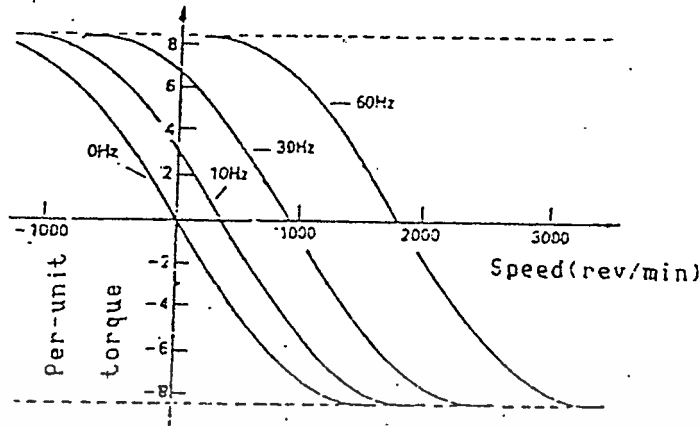
นำไปแทนในสมการที่ (4-67) จะได้แรงบิดเบรคดาวน์เป็น

$$T_b = \pm Pm_1 (E_1 / \omega_1)^2 (1 / 2L_2)^2 \quad (4-69)$$

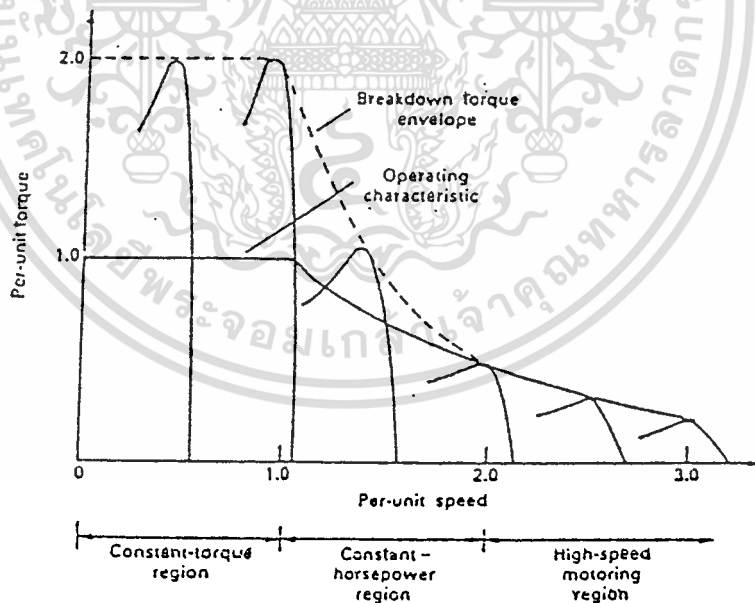
#### 4-10 การทำงานโดยให้แรงดันมีค่าคงที่

การทำงานของ มอเตอร์ในย่านแรงบิดคงที่ จะต้องแปรค่าแรงดันไฟพร้อมกับความถี่เพื่อควบคุมฟลักซ์ให้มีค่าคงที่ ย่านการควบคุมนี้สิ้นสุดที่แรงดันและความถี่มีค่าตามพิกัด อย่างไรก็ตามอินเวอร์เตอร์ก็สามารถจ่ายแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ที่ความถี่สูงกว่าได้ วิธีนี้จะทำให้มอเตอร์มีความเร็วรอบสูงขึ้นกว่าความเร็วฐาน แต่จะต้องลดแรงบิด ที่มอเตอร์สามารถจ่ายได้ลง ด้วยอัตราส่วน  $V/F$  ลง การทำงานในย่านนี้เรียกว่า ย่านกำลังงานคงที่

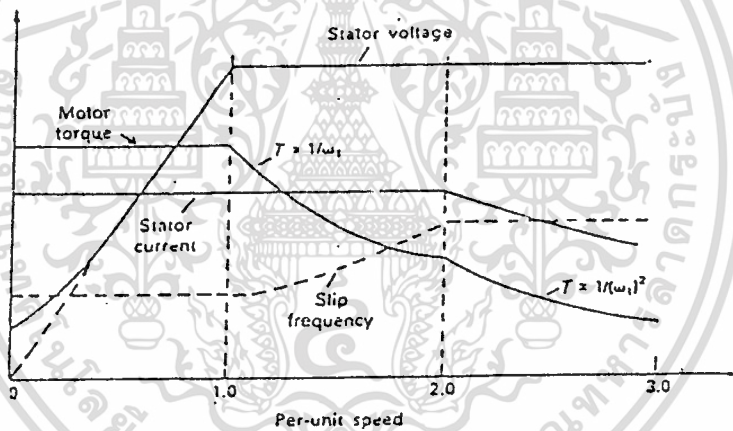
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-6 คุณลักษณะแรงบิด - ความเร็วรอบสำหรับการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ปรับความถี่ได้  
โดยการควบคุมให้ฟลักซ์มีค่าคงที่



รูปที่ 4-7 แสดงเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วที่มีการปรับแรงดันและปรับความถี่  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานของอินเวอร์เตอร์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

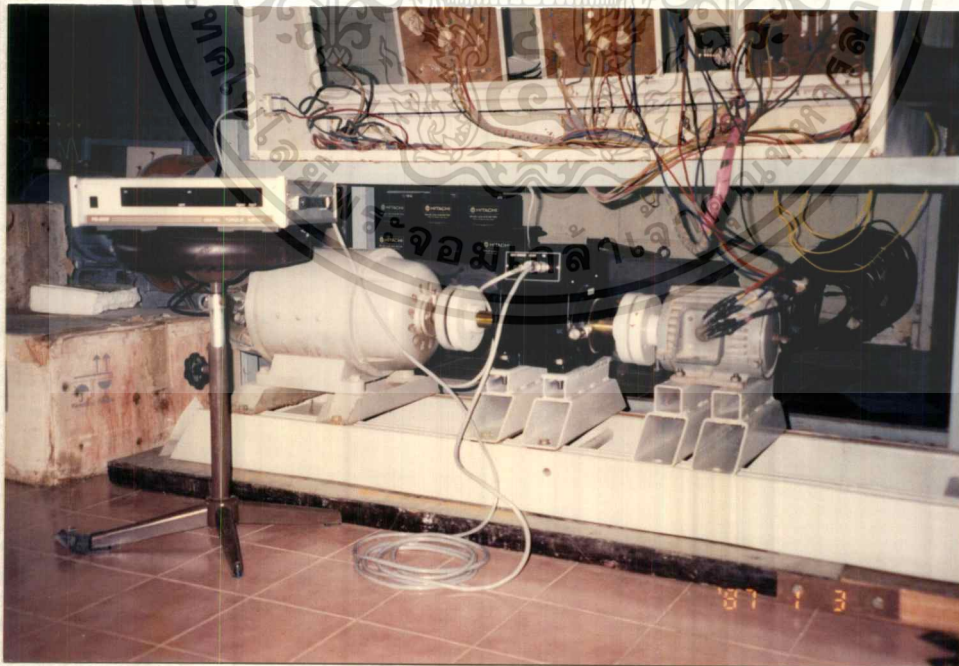


รูปที่ 4-8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและความถี่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

## บทที่ 5

### การคำนวณและการติดตั้งเครื่องตรวจวัดแรงบิด

ในการทำการทดลองและการวิจัยเกี่ยวกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าค่าที่คลาดเคลื่อนที่สุดในการวัดได้แก่ แรงบิด ซึ่งจะส่งผลทำให้การคำนวณกำลังที่แกนหรือประสิทธิภาพที่ได้คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงมาก ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญต่อการวิจัยและศึกษาในโครงการนี้ จึงได้มีการติดตั้งเครื่องตรวจวัดแรงบิดซึ่งเป็นระบบดิจิทัล ค่าที่ได้ออกมาจะมีความแน่นอน ซึ่งจะเป็นส่วนสำคัญทำให้โครงการนี้บรรลุตามเป้าหมาย โดยการติดตั้งเครื่องวัดแรงบิดสิ่งสำคัญที่สุดคือ การที่จะติดตั้งอย่างไรให้การเดินเครื่องของมอเตอร์เหนี่ยวนำไม่มีการกระตุก ซึ่งจะส่งผลให้มอเตอร์เหนี่ยวนำและส่วนที่ต่ออยู่ด้วยคือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเสียหาย โดยทำให้แกนเพลานบิดเสียรูปร่าง ซึ่งในส่วนการติดตั้งเครื่องตรวจวัดแรงบิดเป็นส่วนที่สำคัญและยากที่สุดของโครงการนี้



รูปภาพ ชุดเครื่องตรวจวัดแรงบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิกัดมอเตอร์เหนืยว่นที่ใช้ในการทดลอง

|                       |         |              |
|-----------------------|---------|--------------|
| พิกัดกำลัง            | 1       | แรงแม่       |
| ขั้ว                  | 4       | ขั้ว         |
| ชนิดโรเตอร์           |         | กรงกระรอก    |
| อุณหภูมิที่ทนทนได้    | 110     | องศาเซลเซียส |
| อุณหภูมิห้องที่ใช้งาน | 40      | องศาเซลเซียส |
| เฟรม                  | ชนิด K  |              |
| จำนวนเฟส              | 3       | เฟส          |
| แรงดันไฟฟ้า           | 220/380 | โวลต์        |
| กระแสไฟฟ้า            | 3.5/2   | แอมป์        |
| ความถี่               | 50      | Hz           |
| ความเร็วรอบ           | 1420    | r.p.m        |
| ชนิด(class)           | E       |              |
| พิกัดแรงบิด           | 5.02    | N-m          |

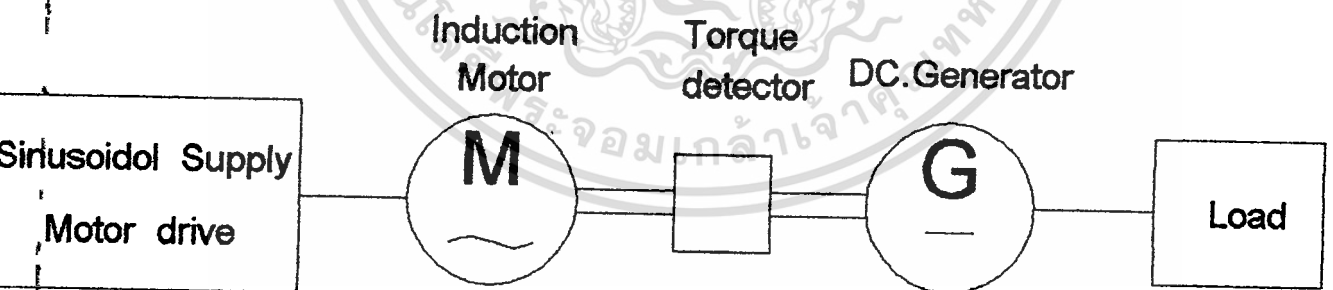
## บทที่ 6

## การศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพจากการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบต่างๆ

ในการทำการวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมความเร็วความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยทั่วไปผู้ที่จะทำวิจัยและในตำราเกี่ยวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำมักจะศึกษาถึงเทคนิคการขับมอเตอร์เหนี่ยวนำและผลกระทบจากองค์ประกอบต่างๆที่ส่งผลต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่ในความเป็นจริงผู้ที่ไปใช้งานส่วนใหญ่จะไม่คำนึงถึงเทคนิคในการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่จะสนใจในประสิทธิภาพการใช้งานมากกว่า นั่นคือการป้อนกำลังงานไฟฟ้าที่เท่ากันจะได้กำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมามีค่ามากหรือน้อยในขณะที่โหลดขนาดเดียวกันโดยการใช้วิธีการควบคุมมอเตอร์แบบต่างๆ

การทดลองควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นตัวขับเคลื่อนตอนในการทดลอง

## 1. ตัวอย่างรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 แสดงวิธีการต่อวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์โดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นตัวขับเคลื่อน  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยทางโรงเรียนอาชีวศึกษาภาคใต้ จังหวัดสุราษฎร์ธานี  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ในขั้นแรกยังไม่ทำการจ่ายโหลดโดยทำการเซ็ทเครื่องให้ได้ค่าคงที่ออกมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงให้มีค่า 220 โวลต์
3. ทำการจ่ายโหลดที่ค่าต่างๆโดยเริ่มจาก 200 วัตต์แล้วทำการบันทึกผลค่าต่างๆลงในตารางโดยวัดในส่วนที่ป้อนกำลังไฟฟ้าเข้าวารีแอค (Variac) ส่วนที่ป้อนให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่วนที่เข้ามอเตอร์เหนี่ยวนำ และส่วนที่ออกจากมอเตอร์เหนี่ยวนำ
4. ทำการเปลี่ยนค่าความถี่ตั้งแต่ 10 Hz ถึง 60 Hz โดยให้เปลี่ยนเป็นอัตราส่วนเดียวกับศักดาไฟฟ้า (V/f) คงที่และบันทึกผล



ความถี่ 50 Hz (No-load)

| กำลังไฟฟ้าจากระบบที่ป้อนเข้า D.C. มอเตอร์ |       |       |     |      |               |       |      |     |     |            |      |      |      |      |
|-------------------------------------------|-------|-------|-----|------|---------------|-------|------|-----|-----|------------|------|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                            |       |       |     |      | กระแสไฟฟ้า(A) |       |      |     |     | กำลังไฟฟ้า |      |      |      |      |
| V peak                                    | V rms | % THD | HM  | CF   | I peak        | I rms | %THD | HM  | CF  | kW         | kVA  | kVAR | PF   | DPF  |
| 321                                       | 225   | 1.1   | 3.0 | 1.43 | 4.6           | 2.57  | 42   | 1.0 | 1.8 | 0.48       | 0.58 | 0.24 | 0.82 | 0.89 |

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |     | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|-----|----------------|------|
|                      | %               | V   | %              | A    |
| 1                    | 100             | 225 | 92.3           | 2.38 |
| 3                    |                 |     | 37.5           | 0.96 |
| 5                    |                 |     | 5.3            | 0.14 |
| 7                    |                 |     | 4.0            | 0.1  |
| 9                    |                 |     | 2.7            | 0.07 |
| 11                   |                 |     |                |      |
| 13                   |                 |     |                |      |

ตารางที่ 6.1 แสดงผลการทดลองบทที่ 6

ความถี่ 50 Hz (No-load)

| กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าอินเวอร์เตอร์ |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |      |      |      |
|------------------------------------|-------|-------|-----|------|---------------|-------|------|------|------|------------|------|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                     |       |       |     |      | กระแสไฟฟ้า(A) |       |      |      |      | กำลังไฟฟ้า |      |      |      |      |
| V peak                             | V rms | % THD | HM  | CF   | I peak        | I rms | %THD | HM   | CF   | kW         | kVA  | kVAR | PF   | DPF  |
| 318                                | 220   | 2.3   | 5.0 | 1.45 | 3.43          | 2.4   | 3.3  | 0.08 | 1.43 | 0.43       | 0.53 | 0.17 | 0.95 | 0.95 |
| ความเร็วรอบ 1400 r.p.m             |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |      | 0.95 | 0.95 |
| แรงบิด 1.27 N-m                    |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |      | 0.95 | 0.95 |

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |     | กระแสไฟฟ้า (A) |     |
|----------------------|-----------------|-----|----------------|-----|
|                      | %               | V   | %              | A   |
| 1                    | 100             | 220 | 100            | 2.4 |
| 3                    |                 |     |                |     |
| 5                    |                 |     |                |     |
| 7                    |                 |     |                |     |
| 9                    |                 |     |                |     |
| 11                   |                 |     |                |     |
| 13                   |                 |     |                |     |

ตารางที่ 6.2 แสดงผลการทดลองบทที่ 6

ความถี่ 10 Hz

| กำลังไฟฟ้าจากระบบที่ป้อนเข้า D.C. มอเตอร์ |       |       |    |    |        |       |               |    |    |    |     |      |    |
|-------------------------------------------|-------|-------|----|----|--------|-------|---------------|----|----|----|-----|------|----|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                            |       |       |    |    |        |       | กระแสไฟฟ้า(A) |    |    |    |     |      |    |
| V peak                                    | V rms | % THD | HM | CF | I peak | I rms | %THD          | HM | CF | kW | kVA | kVAR | PF |
| -                                         | -     | -     | -  | -  | -      | -     | -             | -  | -  | -  | -   | -    | -  |

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |   | กระแสไฟฟ้า (A) |   |
|----------------------|-----------------|---|----------------|---|
|                      | %               | V | %              | A |
| 1                    | -               | - | -              | - |
| 3                    | -               | - | -              | - |
| 5                    | -               | - | -              | - |
| 7                    | -               | - | -              | - |
| 9                    | -               | - | -              | - |
| 11                   | -               | - | -              | - |
| 13                   | -               | - | -              | - |

ตารางที่ 6.3 แสดงผลการทดลองบทที่ 6

ความถี่ 10 Hz

| กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าอิน덕ชันมอเตอร์ |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |      |      |      |
|-------------------------------------|-------|-------|-----|------|---------------|-------|------|------|------|------------|------|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                      |       |       |     |      | กระแสไฟฟ้า(A) |       |      |      |      | กำลังไฟฟ้า |      |      |      |      |
| V peak                              | V rms | % THD | HM  | CF   | I peak        | I rms | %THD | HM   | CF   | kW         | kVA  | kVAR | PF   | DPF  |
| 64                                  | 44    | 3.1   | 1.0 | 1.46 | 0.78          | 0.58  | 10   | 0.07 | 1.45 | 0.08       | 0.12 | 0.08 | 0.72 | 0.72 |

ความเร็วรอบ 285 r.p.m

แรงบิด 0.88 N-m

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |    | กระแสไฟฟ้า (A) |     |
|----------------------|-----------------|----|----------------|-----|
|                      | %               | V  | %              | A   |
| 1                    | 100             | 44 | 100            | .58 |
| 3                    |                 |    |                |     |
| 5                    |                 |    |                |     |
| 7                    |                 |    |                |     |
| 9                    |                 |    |                |     |
| 11                   |                 |    |                |     |
| 13                   |                 |    |                |     |

ตารางที่ 6.4 แสดงผลการทดลองบทที่ 6

ความถี่ 20 Hz

| กำลังไฟฟ้าจากระบบที่ป้อนเข้า D.C. มอเตอร์ |       |       |    |      |               |       |      |     |      |            |      |       |      |      |
|-------------------------------------------|-------|-------|----|------|---------------|-------|------|-----|------|------------|------|-------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                            |       |       |    |      | กระแสไฟฟ้า(A) |       |      |     |      | กำลังไฟฟ้า |      |       |      |      |
| V peak                                    | V rms | % THD | HM | CF   | I peak        | I rms | %THD | HM  | CF   | kW         | kVA  | kVAR  | PF   | DPF  |
| 318                                       | 225   | 0.6   | 1  | 1.42 | 2.4           | 1.53  | 26.3 | 0.4 | 1.56 | 0.3        | 0.37 | 0.18' | 0.83 | 0.86 |

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |     | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|-----|----------------|------|
|                      | %               | V   | %              | A    |
| 1                    | 100             | 225 | 96.5           | 1.48 |
| 3                    |                 |     | 22.3           | 0.34 |
| 5                    |                 |     | 9.7            | 0.15 |
| 7                    |                 |     | 6.2            | 0.1  |
| 9                    |                 |     | 4.5            | 0.07 |
| 11                   |                 |     | 3.5            | 0.05 |
| 13                   |                 |     | 2.9            | 0.04 |

ตารางที่ 6.5 แสดงผลการทดลองบทที่ 6

ความถี่ 20 Hz

| กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าอินคันทันมอเตอร์ |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |      |      |      |
|---------------------------------------|-------|-------|-----|------|---------------|-------|------|------|------|------------|------|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                        |       |       |     |      | กระแสไฟฟ้า(A) |       |      |      |      | กำลังไฟฟ้า |      |      |      |      |
| V peak                                | V rms | % THD | HM  | CF   | I peak        | I rms | %THD | HM   | CF   | kW         | kVA  | kVAR | PF   | DPF  |
| 128                                   | 88    | 2.6   | 2.0 | 1.46 | 3.1           | 2.2   | 4.0  | 0.09 | 1.42 | 0.18       | 0.33 | 0.28 | 0.56 | 0.56 |

ความเร็วรอบ 578 r.p.m

แรงบิด 1.28 N-m

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |    | กระแสไฟฟ้า (A) |     |
|----------------------|-----------------|----|----------------|-----|
|                      | %               | V  | %              | A   |
| 1                    | 100             | 88 | 100            | 2.2 |
| 3                    |                 |    |                |     |
| 5                    |                 |    |                |     |
| 7                    |                 |    |                |     |
| 9                    |                 |    |                |     |
| 11                   |                 |    |                |     |
| 13                   |                 |    |                |     |

ตารางที่ 6.6 แสดงผลการทดลองบทที่ 6

ความถี่ 30 Hz

| กำลังไฟฟ้าจากกระบอกที่ป้อนเข้า D.C. มอเตอร์ |       |       |     |      |        |               |      |      |      |      |      |      |
|---------------------------------------------|-------|-------|-----|------|--------|---------------|------|------|------|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                              |       |       |     |      |        | กระแสไฟฟ้า(A) |      |      |      |      |      |      |
| V peak                                      | V rms | % THD | HM  | CF   | I peak | I rms         | %THD | HM   | CF   | kW   | kVA  | kVAR |
| 319                                         | 225   | 0.7   | 2.0 | 1.42 | 4.33   | 2.66          | 27.9 | 0.71 | 1.63 | 0.5  | 0.6  | 0.29 |
|                                             |       |       |     |      |        |               |      |      |      | PF   | DPF  |      |
|                                             |       |       |     |      |        |               |      |      |      | 0.84 | 0.86 |      |

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |     | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|-----|----------------|------|
|                      | %               | V   | %              | A    |
| 1                    | 100             | 225 | 96.3           | 2.56 |
| 3                    |                 |     | 25.2           | 0.67 |
| 5                    |                 |     | 7.8            | 0.21 |
| 7                    |                 |     | 3.5            | 0.09 |
| 9                    |                 |     |                |      |
| 11                   |                 |     |                |      |
| 13                   |                 |     |                |      |

ตารางที่ 6.7 แสดงผลการทดลองบทที่ 6

ความถี่ 30 Hz

| กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าอินคักชั่นมอเตอร์ |       |       |     |      |               |       |      |     |      |            |      |      |      |      |
|----------------------------------------|-------|-------|-----|------|---------------|-------|------|-----|------|------------|------|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                         |       |       |     |      | กระแสไฟฟ้า(A) |       |      |     |      | กำลังไฟฟ้า |      |      |      |      |
| V peak                                 | V rms | % THD | HM  | CF   | I peak        | I rms | %THD | HM  | CF   | kW         | kVA  | kVAR | PF   | DPF  |
| 191                                    | 132   | 2.4   | 3.0 | 1.45 | 3.35          | 2.34  | 4.5  | 0.1 | 1.41 | 0.28       | 0.54 | 0.45 | 0.52 | 0.54 |

ความถี่ 880 r/min

ความเร็วรอบ 880 r.p.m

แรงบิด 1.47 N-m

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |     | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|-----|----------------|------|
|                      | %               | V   | %              | A    |
| 1                    | 100             | 132 | 100            | 2.34 |
| 3                    |                 |     |                |      |
| 5                    |                 |     |                |      |
| 7                    |                 |     |                |      |
| 9                    |                 |     |                |      |
| 11                   |                 |     |                |      |
| 13                   |                 |     |                |      |

ตารางที่ 6.8 แสดงผลการทดลองบทที่ 6

ความถี่ 40 Hz

| กำลังไฟฟ้าจากระบบที่ป้อนเข้า D.C. มอเตอร์ |       |       |    |      |               |       |      |      |      |            |      |      |      |      |
|-------------------------------------------|-------|-------|----|------|---------------|-------|------|------|------|------------|------|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                            |       |       |    |      | กระแสไฟฟ้า(A) |       |      |      |      | กำลังไฟฟ้า |      |      |      |      |
| V peak                                    | V rms | % THD | HM | CF   | I peak        | I rms | %THD | HM   | CF   | kW         | kVA  | kVAR | PF   | DPF  |
| 318                                       | 224   | 0.7   | 2  | 1.42 | 5.4           | 5.1   | 29.7 | 0.97 | 1.68 | 0.63       | 0.76 | 0.37 | 0.83 | 0.86 |

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |     | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|-----|----------------|------|
|                      | %               | V   | %              | A    |
| 1                    | 100             | 224 | 95.3           | 3.03 |
| 3                    |                 |     | 29             | 0.91 |
| 5                    |                 |     | 7.4            | 0.23 |
| 7                    |                 |     | 2.9            | 0.09 |
| 9                    |                 |     |                |      |
| 11                   |                 |     |                |      |
| 13                   |                 |     |                |      |

ตารางที่ 6.9 แสดงผลการทดลองบทที่ 6

ความถี่ 40 Hz

| กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าอินคันทันมอเตอร์ |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|---------------------------------------|-------|-------|-----|------|---------------|-------|------|------|------|------------|-----|--|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                        |       |       |     |      | กระแสไฟฟ้า(A) |       |      |      |      | กำลังไฟฟ้า |     |  |
| V peak                                | V rms | % THD | HM  | CF   | I peak        | I rms | %THD | HM   | CF   | kW         | kVA |  |
| 255                                   | 176   | 2.3   | 4.0 | 1.45 | 3.58          | 2.5   | 3.5  | 0.09 | 1.43 | 0.4        | 0.7 |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |     |  |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      | </         |     |  |

ความถี่ 50 HZ

| กำลังไฟฟ้าจากระบบที่ป้อนเข้า D.C. มอเตอร์ |       |       |     |      |        |               |      |      |      |      |      |
|-------------------------------------------|-------|-------|-----|------|--------|---------------|------|------|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                            |       |       |     |      |        | กระแสไฟฟ้า(A) |      |      |      |      |      |
| V peak                                    | V rms | % THD | HM  | CF   | I peak | I rms         | %THD | HM   | CF   | kW   | kVA  |
| 316                                       | 223   | 0.7   | 2.0 | 1.42 | 7.1    | 4.12          | 33.1 | 1.35 | 1.73 | 0.75 | 0.93 |
|                                           |       |       |     |      |        |               |      |      |      |      | kVAR |
|                                           |       |       |     |      |        |               |      |      |      |      | PF   |
|                                           |       |       |     |      |        |               |      |      |      |      | DPF  |
|                                           |       |       |     |      |        |               |      |      |      |      | 0.86 |

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า(V) |     | กระแสไฟฟ้า(A) |      |
|----------------------|----------------|-----|---------------|------|
|                      | %              | V   | %             | A    |
| 1                    | 100            | 223 | 94.4          | 3.9  |
| 3                    |                |     | 32            | 1.32 |
| 5                    |                |     | 7.1           | 0.29 |
| 7                    |                |     | 2.9           | 0.11 |
| 9                    |                |     |               |      |
| 11                   |                |     |               |      |
| 13                   |                |     |               |      |

ตารางที่ 6.11 แสดงผลการทดลองบทที่ 6

ความถี่ 50 Hz

| กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าอินเวอร์เตอร์ |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |      |     |     |
|------------------------------------|-------|-------|-----|------|---------------|-------|------|------|------|------------|------|------|-----|-----|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                     |       |       |     |      | กระแสไฟฟ้า(A) |       |      |      |      | กำลังไฟฟ้า |      |      |     |     |
| V peak                             | V rms | % THD | HM  | CF   | I peak        | I rms | %THD | HM   | CF   | kW         | kVA  | kVAR | PF  | DPF |
| 318                                | 220   | 2.2   | 5.0 | 1.43 | 3.57          | 2.54  | 3.2  | 0.08 | 1.42 | 0.5        | 0.99 | 0.84 | 0.5 | 0.5 |

ความเร็วรอบ 1477 r.p.m

แรงบิด 2.35 N-m

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |     | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|-----|----------------|------|
|                      | %               | V   | %              | A    |
| 1                    | 100             | 220 | 100            | 2.54 |
| 3                    |                 |     |                |      |
| 5                    |                 |     |                |      |
| 7                    |                 |     |                |      |
| 9                    |                 |     |                |      |
| 11                   |                 |     |                |      |
| 13                   |                 |     |                |      |

ตารางที่ 6.12 แสดงผลการทดลองบทที่ 6

ความถี่ 60 Hz

| กำลังไฟฟ้าจากระบบที่ป้อนเข้า D.C. มอเตอร์ |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |      |      |      |
|-------------------------------------------|-------|-------|-----|------|---------------|-------|------|------|------|------------|------|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                            |       |       |     |      | กระแสไฟฟ้า(A) |       |      |      |      | กำลังไฟฟ้า |      |      |      |      |
| V peak                                    | V rms | % THD | HM  | CF   | I peak        | I rms | %THD | HM   | CF   | kW         | kVA  | kVAR | PF   | DPF  |
| 319                                       | 224   | 1.0   | 2.0 | 1.42 | 9.2           | 5.29  | 34.5 | 1.82 | 1.74 | 0.98       | 1.19 | 0.56 | 0.82 | 0.86 |

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |     | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|-----|----------------|------|
|                      | %               | V   | %              | A    |
| 1                    | 100             | 224 | 93.8           | 4.95 |
| 3                    |                 |     | 33.6           | 1.77 |
| 5                    |                 |     | 6.7            | 0.36 |
| 7                    |                 |     | 3.0            | 0.16 |
| 9                    |                 |     |                |      |
| 11                   |                 |     |                |      |
| 13                   |                 |     |                |      |

ตารางที่ 6.13 แสดงผลการทดลองบทที่ 6

ความถี่ 60 Hz

| กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าอินเวอร์เตอร์ |       |       |    |      |        |               |      |      |     |      |     |
|------------------------------------|-------|-------|----|------|--------|---------------|------|------|-----|------|-----|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                     |       |       |    |      |        | กระแสไฟฟ้า(A) |      |      |     |      |     |
| V peak                             | V rms | % THD | HM | CF   | I peak | I rms         | %THD | HM   | CF  | kW   | kVA |
| 380                                | 264   | 2.2   | 6  | 1.45 | 3.7    | 2.65          | 3.1  | 0.08 | 1.4 | 0.61 | 1.2 |

ความเร็วรอบ 1764 r.p.m  
แรงบิด 2.65 N.m

กำลังไฟฟ้า

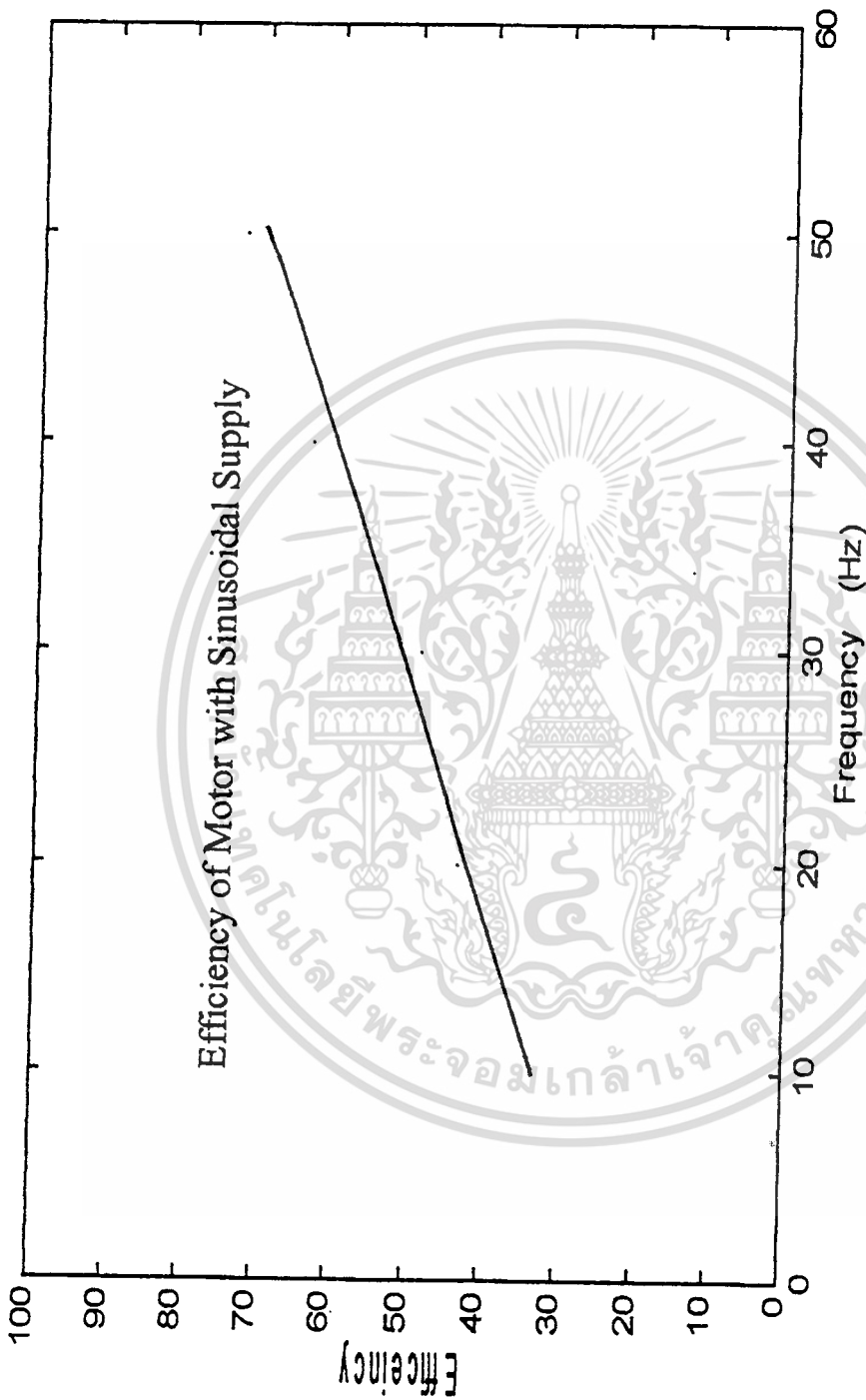
PF  
0.51  
DPF  
0.54

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |     | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|-----|----------------|------|
|                      | %               | V   | %              | A    |
| 1                    | 100             | 264 | 100            | 2.58 |
| 3                    |                 |     |                |      |
| 5                    |                 |     |                |      |
| 7                    |                 |     |                |      |
| 9                    |                 |     |                |      |
| 11                   |                 |     |                |      |
| 13                   |                 |     |                |      |

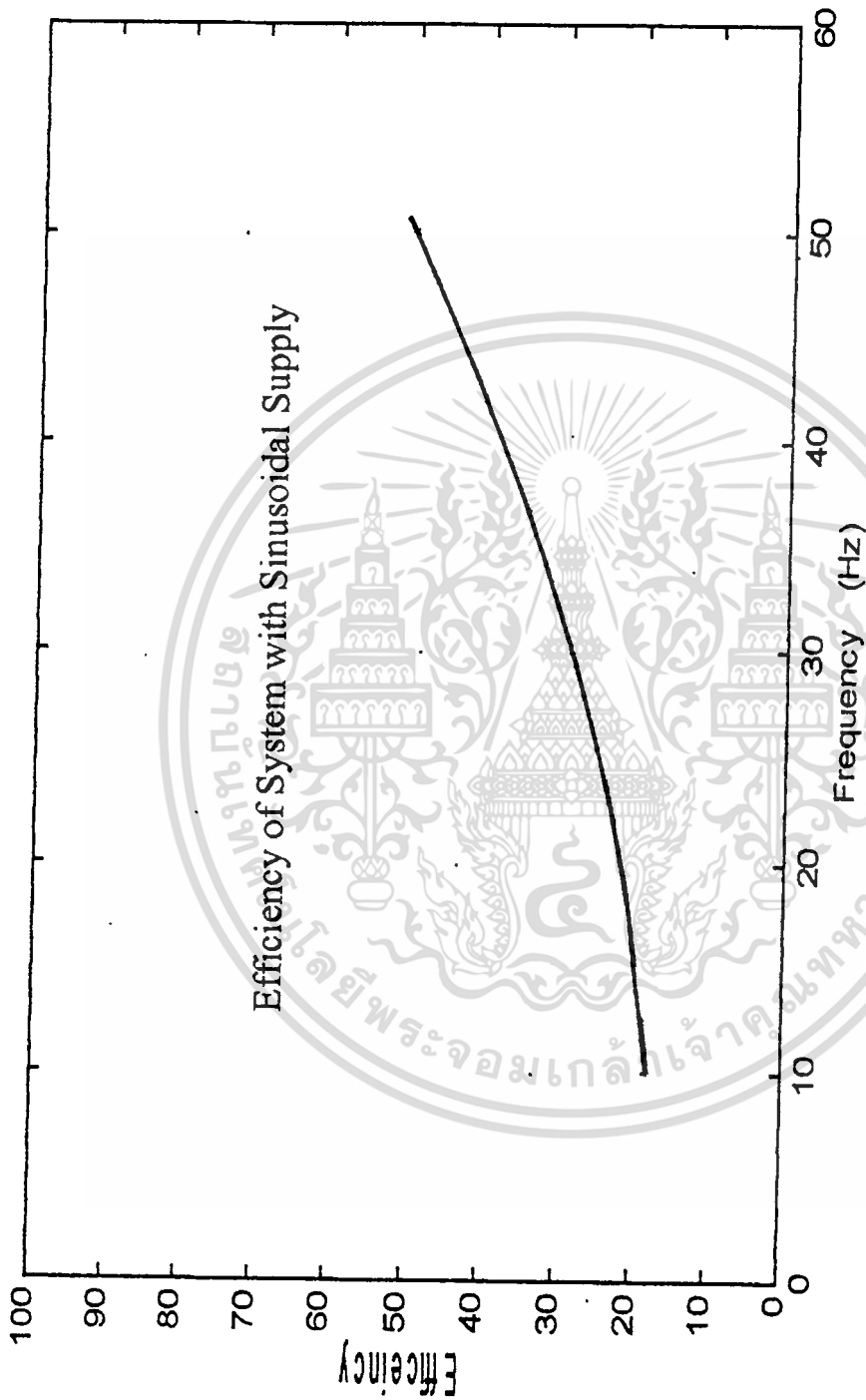
ตารางที่ 6.14 แสดงผลการทดลองบทที่ 6

| กำลังไฟฟ้าที่เข้า D.C.มอเตอร์ |      | กำลังไฟฟ้าที่อินดักชันมอเตอร์ |                        |                            |              |                         |                            |                         |
|-------------------------------|------|-------------------------------|------------------------|----------------------------|--------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------|
| ความถี่(Hz)                   | KW   | KW                            | ความเร็วรอบ<br>(r.p.m) | ความเร็ว<br>เชิงมุม(rad/s) | แรงบิด (N-m) | กำลังไฟฟ้าที่<br>แกน(W) | ประสิทธิภาพ<br>มอเตอร์ (%) | ประสิทธิภาพ<br>ระบบ( %) |
| 10                            | -    | 0.08                          | 285                    | 29.85                      | 0.88         | 26.27                   | 32.84                      | -                       |
| 20                            | 0.3  | 0.18                          | 578                    | 60.53                      | 1.28         | 77.48                   | 43.04                      | 25.83                   |
| 30                            | 0.50 | 0.28                          | 880                    | 92.15                      | 1.47         | 135.46                  | 48.38                      | 27.09                   |
| 40                            | 0.63 | 0.40                          | 1175                   | 123.05                     | 2.06         | 253.48                  | 63.37                      | 40.23                   |
| 50                            | 0.75 | 0.50                          | 1477                   | 154.67                     | 2.35         | 363.47                  | 72.7                       | 48.86                   |

ตารางที่ 6.15 แสดงประสิทธิภาพของอินดักชันมอเตอร์เมื่อใช้เงินมอเตอร์เป็นตัวแทนความเร็วรอบ



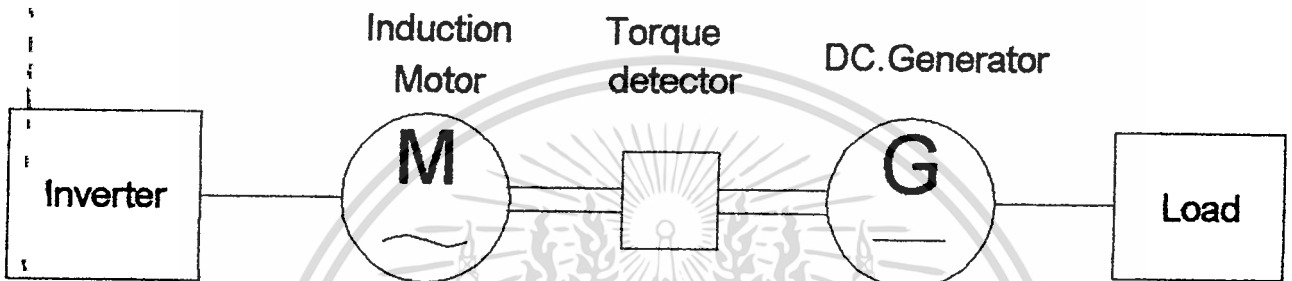
รูปที่ 6.2 ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำจากการจ่ายกำลังไฟด้วยเครื่องกำเนิด



รูปที่ 6.3 ประสิทธิภาพของระบบจากการจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิด

การทดลองควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้อินเวอร์เตอร์เป็นตัวขับ  
ขั้นตอนในการทดลอง

1 ต่อวงจรดังรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 แสดงวิธีการต่อวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์โดยใช้อินเวอร์เตอร์

2. ในขั้นแรกยังไม่ทำการจ่ายโหลดโดยทำการเชื่อมต่อเครื่องให้ได้ค่าคงที่ออกมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงให้มีค่า 220 โวลต์
3. ทำการจ่ายโหลดที่ค่าต่างๆโดยเริ่มจาก 200 วัตต์แล้วทำการบันทึกผลค่าต่างๆดังในตารางโดยวัดในส่วนที่ป้อนกำลังไฟฟ้าเข้าวาริแอค (Variac) ส่วนที่ป้อนให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่วนที่เข้ามอเตอร์เหนี่ยวนำ และส่วนที่ออกจากมอเตอร์เหนี่ยวนำ
4. ทำการเปลี่ยนค่าความถี่ตั้งแต่ 10 Hz ถึง 80 Hz แล้วบันทึกผลลงในตาราง

ความถี่ 50 Hz (No-load)

| กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าอินเวอร์เตอร์ |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |     |      |      |     |
|------------------------------------|-------|-------|-----|------|---------------|-------|------|------|-----|------------|-----|------|------|-----|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                     |       |       |     |      | กระแสไฟฟ้า(A) |       |      |      |     | กำลังไฟฟ้า |     |      |      |     |
| V peak                             | V rms | % THD | HM  | CF   | I peak        | I rms | %THD | HM   | CF  | kW         | KVA | kVAR | PF   | DPF |
| 562                                | 397   | 2.8   | 3.0 | 1.42 | 6.30          | 1.48  | 99.8 | 1.43 | 4.2 | 0.4        | 1.0 | 0.3  | 0.36 | 0.8 |

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |     | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|-----|----------------|------|
|                      | %               | V   | %              | A    |
| 1                    | 100             | 397 | 6.5            | 0.1  |
| 3                    |                 |     | 7.0            | 0.09 |
| 5                    |                 |     | 6.0            | 0.1  |
| 7                    |                 |     | 6.0            | 0.1  |
| 9                    |                 |     | 6.0            | 0.1  |
| 11                   |                 |     | 5.5            | 0.08 |
| 13                   |                 |     | 6.0            | 0.09 |

ตารางที่ 6.16 แสดงผลการทดลองบทที่ 6

| กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าอิน덕ชันมอเตอร์ |       |       |      |      |               |       |      |      |      |            |      |      |      |      |
|-------------------------------------|-------|-------|------|------|---------------|-------|------|------|------|------------|------|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                      |       |       |      |      | กระแสไฟฟ้า(A) |       |      |      |      | กำลังไฟฟ้า |      |      |      |      |
| V peak                              | V rms | % THD | HM   | CF   | I peak        | I rms | %THD | HM   | CF   | kW         | KVA  | kVAR | PF   | DPF  |
| 610                                 | 429   | 21.7  | 90.0 | 1.42 | 2.45          | 1.60  | 10.0 | 0.17 | 1.54 | 0.32       | 1.19 | 1.06 | 0.26 | 0.30 |

แรงบิด 1.18 N-m

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกที่ | แรงดันไฟฟ้า (V) |      | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|-----------------------|-----------------|------|----------------|------|
|                       | %               | V    | %              | A    |
| 1                     | 97.6            | 406  | 99.4           | 1.56 |
| 3                     |                 |      | 2.7            | 0.03 |
| 5                     | 0.7             | 3.0  | 3.0            | 0.05 |
| 7                     | 2.8             | 12.0 | 4.3            | 0.07 |
| 9                     |                 |      |                |      |
| 11                    | 2.2             | 9.0  |                |      |
| 13                    | 2.2             | 9.0  |                |      |

103

ความถี่ 10 Hz

| กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าอินเวอร์เตอร์ |       |       |     |      |        |               |      |    |    |      |     |
|------------------------------------|-------|-------|-----|------|--------|---------------|------|----|----|------|-----|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                     |       |       |     |      |        | กระแสไฟฟ้า(A) |      |    |    |      |     |
| V peak                             | V rms | % THD | HM  | CF   | I peak | I rms         | %THD | HM | CF | kW   | KVA |
| 556                                | 393   | 0.8   | 3.0 | 1.41 | -      | 1.18          | 59   | -  | -  | 0.1  | 0.4 |
|                                    |       |       |     |      |        |               |      |    |    | kVAR | PF  |
|                                    |       |       |     |      |        |               |      |    |    | 0.01 | 0.3 |
|                                    |       |       |     |      |        |               |      |    |    | DPF  | -   |

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |     | กระแสไฟฟ้า (A) |   |
|----------------------|-----------------|-----|----------------|---|
|                      | %               | V   | %              | A |
| 1                    | 100             | 393 |                |   |
| 3                    |                 |     |                |   |
| 5                    |                 |     |                |   |
| 7                    |                 |     |                |   |
| 9                    |                 |     |                |   |
| 11                   |                 |     |                |   |
| 13                   |                 |     |                |   |

หมายเหตุ ค่ากระแสไฟฟ้าไม่สามารถวัดค่าออกมาได้เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

ตารางที่ 6.18 แสดงผลการทดลองบทที่ 6

ความถี่ 10 Hz

| กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าอิน덕ชันมอเตอร์ |       |       |     |      |               |       |      |     |      |            |     |      |      |      |
|-------------------------------------|-------|-------|-----|------|---------------|-------|------|-----|------|------------|-----|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                      |       |       |     |      | กระแสไฟฟ้า(A) |       |      |     |      | กำลังไฟฟ้า |     |      |      |      |
| V peak                              | V rms | % THD | HM  | CF   | I peak        | I rms | %THD | HM  | CF   | kW         | KVA | kVAR | PF   | DPF  |
| 47                                  | 101   | 6.9   | 7.0 | 1.45 | 2.98          | 2.05  | 10.7 | 1.3 | 1.44 | 0.09       | 0.4 | 0.3  | 0.68 | 0.70 |

ความเร็วรอบ 200 r/min

ความเร็วรอบ 290 r.p.m

แรงบิด 0.88 N-m

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |     | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|-----|----------------|------|
|                      | %               | V   | %              | A    |
| 1                    | 99.8            | 101 | 99.4           | 2.02 |
| 3                    |                 |     |                |      |
| 5                    | 6.2             | 6.0 | 10.7           | 0.21 |
| 7                    | 0.5             | 1.0 |                |      |
| 9                    |                 |     |                |      |
| 11                   |                 |     |                |      |
| 13                   |                 |     |                |      |

ตารางที่ 6.19 แสดงผลการทดลองบทที่ 6

ความถี่ 20 Hz

| กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าอินเวอร์เตอร์ |       |       |     |      |        |               |      |     |     |      |      |      |
|------------------------------------|-------|-------|-----|------|--------|---------------|------|-----|-----|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                     |       |       |     |      |        | กระแสไฟฟ้า(A) |      |     |     |      |      |      |
| V peak                             | V rms | % THD | HM  | CF   | I peak | I rms         | %THD | HM  | CF  | kW   | KVA  | kVAR |
| 552                                | 392   | 0.7   | 3.0 | 1.41 | 5.5    | 1.22          | 88   | 1.2 | 4.7 | 0.29 | 0.76 | 0.23 |
|                                    |       |       |     |      |        |               |      |     |     | PF   | DPF  |      |
|                                    |       |       |     |      |        |               |      |     |     | 0.37 | 0.81 |      |

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |     | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|-----|----------------|------|
|                      | %               | V   | %              | A    |
| 1                    | 100             | 392 | 47             | 0.58 |
| 3                    |                 |     | 35             | 0.45 |
| 5                    |                 |     | 36             | 0.4  |
| 7                    |                 |     | 33.7           | 0.4  |
| 9                    |                 |     | 30.0           | 0.39 |
| 11                   |                 |     | 27.8           | 0.32 |
| 13                   |                 |     | 25.8           | 0.3  |

ตารางที่ 6.20 แสดงผลการทดลองบทที่ 6

ความถี่ 20 Hz

| กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าอินดักชั่นมอเตอร์ |       |       |     |     |        |               |      |      |      |      |      |
|----------------------------------------|-------|-------|-----|-----|--------|---------------|------|------|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                         |       |       |     |     |        | กระแสไฟฟ้า(A) |      |      |      |      |      |
| V peak                                 | V rms | % THD | HM  | CF  | I peak | I rms         | %THD | HM   | CF   | kW   | kVAR |
| 54                                     | 252   | 5.3   | 9.0 | 1.0 | 2.3    | 1.74          | 9.0  | 0.15 | 1.34 | 0.25 | 0.42 |

ความเร็วรอบ 585 r.p.m

แรงบิด 1.47 N-m

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |     | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|-----|----------------|------|
|                      | %               | V   | %              | A    |
| 1                    | 99.9            | 172 | 99.6           | 1.64 |
| 3                    |                 |     | 2.0            | 0.03 |
| 5                    | 4.1             | 7.0 | 7.5            | 0.12 |
| 7                    | 2.0             | 4.0 | 3.8            | 0.07 |
| 9                    |                 |     |                |      |
| 11                   |                 |     |                |      |
| 13                   | 1.3             | 2.0 |                |      |

ตารางที่ 6.21 แสดงผลการทดลองบทที่ 6

ความถี่ 30 Hz

| กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าอินเวอร์เตอร์ |       |       |     |      |               |       |      |    |    |            |     |      |
|------------------------------------|-------|-------|-----|------|---------------|-------|------|----|----|------------|-----|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                     |       |       |     |      | กระแสไฟฟ้า(A) |       |      |    |    | กำลังไฟฟ้า |     |      |
| V peak                             | V rms | % THD | HM  | CF   | I peak        | I rms | %THD | HM | CF | kW         | KVA | PF   |
| 548                                | 388   | 0.6   | 2.0 | 1.42 | -             | 1.56  | 100  | -  | -  | 0.41       | 1.2 | 0.38 |
|                                    |       |       |     |      |               |       |      |    |    | 0.41       | 0.4 | -    |

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |     | กระแสไฟฟ้า (A) |   |
|----------------------|-----------------|-----|----------------|---|
|                      | %               | V   | %              | A |
| 1                    | 100             | 388 |                |   |
| 3                    |                 |     |                |   |
| 5                    |                 |     |                |   |
| 7                    |                 |     |                |   |
| 9                    |                 |     |                |   |
| 11                   |                 |     |                |   |
| 13                   |                 |     |                |   |

หมายเหตุ ค่ากระแสไฟฟ้าไม่สามารถวัดค่าออกมาได้เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

ตารางที่ 6.22 แสดงผลการทดลองบทที่ 6

ความถี่ 30 Hz

| กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าอินดักชันมอเตอร์ |       |       |      |      |        |               |      |     |     |     |      |
|---------------------------------------|-------|-------|------|------|--------|---------------|------|-----|-----|-----|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                        |       |       |      |      |        | กระแสไฟฟ้า(A) |      |     |     |     |      |
| V peak                                | V rms | % THD | HM   | CF   | I peak | I rms         | %THD | HM  | CF  | kW  | KVA  |
| 50                                    | 310   | 5.2   | 13.0 | 1.13 | 3.0    | 2.2           | 99.3 | 0.3 | 1.3 | 0.3 | 0.89 |

ความเร็วรอบ 877 r.p.m

แรงบิด 1.47 N-m

กำลังไฟฟ้า

| ลำดับ<br>สารโมโนคลัส | แรงดันไฟฟ้า (V) |     | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|-----|----------------|------|
|                      | %               | V   | %              | A    |
| 1                    | 99.9            | 244 | 12.4           | 0.18 |
| 3                    |                 |     | 11.6           | 0.18 |
| 5                    | 3.2             | 8.0 |                |      |
| 7                    | 2.6             | 6.0 |                |      |
| 9                    |                 |     | 6.0            | 0.09 |
| 11                   |                 |     |                |      |
| 13                   |                 |     |                |      |

ตารางที่ 6.23 แสดงผลการทดลองบทที่ 6

ความถี่ 40 Hz

| กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าอินเวอร์เตอร์ |       |       |     |      |               |       |      |     |      |            |     |      |      |      |
|------------------------------------|-------|-------|-----|------|---------------|-------|------|-----|------|------------|-----|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                     |       |       |     |      | กระแสไฟฟ้า(A) |       |      |     |      | กำลังไฟฟ้า |     |      |      |      |
| V peak                             | V rms | % THD | HM  | CF   | I peak        | I rms | %THD | HM  | CF   | kW         | KVA | kVAR | PF   | DPF  |
| 554                                | 392   | 0.7   | 3.0 | 1.41 | 9.4           | 2.10  | 88.4 | 1.8 | 4.45 | 0.5        | 1.4 | 0.4  | 0.38 | 0.83 |

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |     | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|-----|----------------|------|
|                      | %               | V   | %              | A    |
| 1                    | 100             | 392 | 47             | 0.98 |
| 3                    |                 |     | 39             | 0.77 |
| 5                    |                 |     | 38             | 0.8  |
| 7                    |                 |     | 35.5           | 0.71 |
| 9                    |                 |     | 32.0           | 0.6  |
| 11                   |                 |     | 28.5           | 0.54 |
| 13                   |                 |     | 25.0           | 0.50 |

ตารางที่ 6.24 แสดงผลการทดลองบทที่ 6

ความถี่ 40 Hz

| กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าอินเวอร์เตอร์ |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|------------------------------------|-------|-------|------|------|---------------|-------|------|------|-----|------------|-----|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                     |       |       |      |      | กระแสไฟฟ้า(A) |       |      |      |     | กำลังไฟฟ้า |     |
| V peak                             | V rms | % THD | HM   | CF   | I peak        | I rms | %THD | HM   | CF  | kW         | KVA |
| 460                                | 360   | 4.5   | 15.0 | 1.27 | 2.23          | 1.59  | 7.8  | 0.12 | 1.4 | 0.4        | 1.0 |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       |       |      |      |               |       |      |      |     |            |     |
|                                    |       | </    |      |      |               |       |      |      |     |            |     |

ความถี่ 50 Hz

| กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าอินเวอร์เตอร์ |       |       |     |      |        |               |      |      |     |      |      |            |
|------------------------------------|-------|-------|-----|------|--------|---------------|------|------|-----|------|------|------------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                     |       |       |     |      |        | กระแสไฟฟ้า(A) |      |      |     |      |      | กำลังไฟฟ้า |
| V peak                             | V rms | % THD | HM  | CF   | I peak | I rms         | %THD | HM   | CF  | kW   | KVA  | PF         |
| 554                                | 392   | 0.7   | 3.0 | 1.41 | 11.0   | 2.1           | 9.8  | 2.47 | 4.0 | 0.54 | 1.80 | 0.27       |
|                                    |       |       |     |      |        |               |      |      |     |      |      | -          |

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |     | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|-----|----------------|------|
|                      | %               | V   | %              | A    |
| 1                    | 100             | 392 | 9.8            | 0.15 |
| 3                    |                 |     | 6.0            | 0.14 |
| 5                    |                 |     | 6.0            | 0.16 |
| 7                    |                 |     | 5.7            | 0.13 |
| 9                    |                 |     | 5.8            | 0.13 |
| 11                   |                 |     | 6.0            | 0.13 |
| 13                   |                 |     | 5.0            | 0.16 |

ตารางที่ 6.26 แสดงผลการทดลองบทที่ 6

ความถี่ 50 Hz

| กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าอิน덕ชันมอเตอร์ |       |       |    |      |               |       |      |      |      |            |     |      |
|-------------------------------------|-------|-------|----|------|---------------|-------|------|------|------|------------|-----|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                      |       |       |    |      | กระแสไฟฟ้า(A) |       |      |      |      | กำลังไฟฟ้า |     |      |
| V peak                              | V rms | % THD | HM | CF   | I peak        | I rms | %THD | HM   | CF   | kW         | KVA | DPF  |
| 603                                 | 423   | 21.4  | 88 | 1.42 | 2.4           | 1.64  | 8.7  | 0.17 | 1.44 | 0.52       | 1.2 | 0.47 |

ความเร็วรอบ 1470 r.p.m

แรงบิด 2.45 N-m

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |      | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|------|----------------|------|
|                      | %               | V    | %              | A    |
| 1                    | 97.7            | 403  | 99.8           | 1.66 |
| 3                    |                 |      | 2.8            | 0.08 |
| 5                    | 0.7             | 3.0  | 2.3            | 0.03 |
| 7                    | 2.8             | 11.0 | 4.8            | 0.08 |
| 9                    |                 |      |                |      |
| 11                   | 2.0             | 9.0  | 1.8            | 0.03 |
| 13                   | 2.3             | 9.0  | 1.7            | 0.03 |

ตารางที่ 6.27 แสดงผลการทดลองบทที่ 6

ความถี่ 60 Hz

| กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าอินเวอร์เตอร์ |       |       |     |      |        |               |      |      |      |            |      |
|------------------------------------|-------|-------|-----|------|--------|---------------|------|------|------|------------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                     |       |       |     |      |        | กระแสไฟฟ้า(A) |      |      |      |            |      |
| V peak                             | V rms | % THD | HM  | CF   | I peak | I rms         | %THD | HM   | CF   | kW         | kVA  |
| 555                                | 392   | 0.8   | 3.0 | 1.42 | 3.6    | 2.63          | 99.3 | 1.38 | 1.29 | 0.58       | 1.98 |
|                                    |       |       |     |      |        |               |      |      |      | กำลังไฟฟ้า |      |
|                                    |       |       |     |      |        |               |      |      |      | kVAR       | PF   |
|                                    |       |       |     |      |        |               |      |      |      | 0.55       | 0.26 |
|                                    |       |       |     |      |        |               |      |      |      | DPF        | -    |

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |     | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|-----|----------------|------|
|                      | %               | V   | %              | A    |
| 1                    | 100             | 392 | 12.4           | 0.17 |
| 3                    |                 |     |                |      |
| 5                    |                 |     |                |      |
| 7                    |                 |     | 76.4           | 1.05 |
| 9                    |                 |     |                |      |
| 11                   |                 |     |                |      |
| 13                   |                 |     | 11.6           | 0.16 |

ตารางที่ 6.28 แสดงผลการทดลองบทที่ 6

ความถี่ 60 Hz

| กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าอินดักชันมอเตอร์ |       |       |      |      |               |       |      |     |     |            |      |      |      |      |
|---------------------------------------|-------|-------|------|------|---------------|-------|------|-----|-----|------------|------|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                        |       |       |      |      | กระแสไฟฟ้า(A) |       |      |     |     | กำลังไฟฟ้า |      |      |      |      |
| V peak                                | V rms | % THD | HM   | CF   | I peak        | I rms | %THD | HM  | CF  | kW         | KVA  | kVAR | PF   | DPF  |
| 604                                   | 418   | 22.0  | 91.0 | 1.44 | 2.0           | 1.39  | 8.5  | 0.1 | 1.4 | 0.58       | 1.02 | 0.75 | 0.57 | 0.62 |
| ความเร็วรอบ 1752 rpm                  |       |       |      |      |               |       |      |     |     |            |      |      |      |      |

ความเร็วรอบ 1757 r.p.m

แรงบิด 2.65 N-m

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |     | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|-----|----------------|------|
|                      | %               | V   | %              | A    |
| 1                    | 97.5            | 404 | 99.9           | 1.34 |
| 3                    |                 |     |                |      |
| 5                    |                 |     | 3.0            | 0.04 |
| 7                    |                 |     | 5.0            | 0.07 |
| 9                    |                 |     |                |      |
| 11                   |                 |     |                |      |
| 13                   |                 |     |                |      |

ตารางที่ 6.29 แสดงผลการทดลองบทที่ 6

ความถี่ 70 Hz

| กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าอินเวอร์เตอร์ |       |       |     |      |        |               |      |     |    |      |      |
|------------------------------------|-------|-------|-----|------|--------|---------------|------|-----|----|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                     |       |       |     |      |        | กระแสไฟฟ้า(A) |      |     |    |      |      |
| V peak                             | V rms | % THD | HM  | CF   | I peak | I rms         | %THD | HM  | CF | kW   | kVA  |
| 551                                | 390   | 0.6   | 2.0 | 1.41 | -      | 3.12          | 99.0 | 1.3 | -  | 0.6  | 2.02 |
|                                    |       |       |     |      |        |               |      |     |    | kVAR | PF   |
|                                    |       |       |     |      |        |               |      |     |    | 0.6  | 0.30 |
|                                    |       |       |     |      |        |               |      |     |    | DPF  | -    |

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |     | กระแสไฟฟ้า (A) |   |
|----------------------|-----------------|-----|----------------|---|
|                      | %               | V   | %              | A |
| 1                    | 100             | 390 |                |   |
| 3                    |                 |     |                |   |
| 5                    |                 |     |                |   |
| 7                    |                 |     |                |   |
| 9                    |                 |     |                |   |
| 11                   |                 |     |                |   |
| 13                   |                 |     |                |   |

หมายเหตุ ค่ากระแสไฟฟ้าไม่สามารถวัดค่าออกมาได้เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

ตารางที่ 6.30 แสดงผลการทดลองบทที่ 6

| กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าอินคันทันมอเตอร์ |       |       |     |      |               |       |      |     |      |            |      |      |      |      |
|---------------------------------------|-------|-------|-----|------|---------------|-------|------|-----|------|------------|------|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                        |       |       |     |      | กระแสไฟฟ้า(A) |       |      |     |      | กำลังไฟฟ้า |      |      |      |      |
| V peak                                | V rms | % THD | HM  | CF   | I peak        | I rms | %THD | HM  | CF   | kW         | KVA  | kVAR | PF   | DPF  |
| 57                                    | 418   | 34.8  | 128 | 1.57 | 2.6           | 1.9   | 17.0 | 0.4 | 1.39 | 0.34       | 0.55 | 0.39 | 0.62 | 0.65 |

แรงบิด 2.75 N-m

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |      | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|------|----------------|------|
|                      | %               | V    | %              | A    |
| 1                    | 95.1            | 397  | 99.8           | 1.3  |
| 3                    |                 |      | 2.0            | 0.03 |
| 5                    | 0.8             | 3.0  |                |      |
| 7                    | 4.1             | 17.0 | 6.8            | 0.09 |
| 9                    |                 |      |                |      |
| 11                   | 3.1             | 13.0 | 1.6            | 0.02 |
| 13                   | 4.0             | 17.0 | 1.2            | 0.02 |

ตารางที่ 6.31 แสดงผลการทดลองบทที่ 6

ความถี่ 80 Hz

| กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าอินเวอร์เตอร์ |       |       |     |      |        |               |      |      |      |      |      |      |
|------------------------------------|-------|-------|-----|------|--------|---------------|------|------|------|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                     |       |       |     |      |        | กระแสไฟฟ้า(A) |      |      |      |      |      |      |
| V peak                             | V rms | % THD | HM  | CF   | I peak | I rms         | %THD | HM   | CF   | kW   | KVA  | kVAR |
| 554                                | 391   | 0.8   | 3.0 | 1.41 | 14.2   | 3.55          | 88.3 | 3.02 | 4.20 | 0.89 | 2.29 | 0.59 |
|                                    |       |       |     |      |        |               |      |      |      | PF   | DPF  |      |
|                                    |       |       |     |      |        |               |      |      |      | 0.39 | 0.84 |      |

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |     | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|-----|----------------|------|
|                      | %               | V   | %              | A    |
| 1                    | 100             | 391 | 47.0           | 1.6  |
| 3                    |                 |     | 42.0           | 1.48 |
| 5                    |                 |     | 40.0           | 1.34 |
| 7                    |                 |     | 36.6           | 1.21 |
| 9                    |                 |     | 32.0           | 1.07 |
| 11                   |                 |     | 28.0           | 0.95 |
| 13                   |                 |     | 23.6           | 0.8  |

ตารางที่ 6.32 แสดงผลการทดลองบทที่ 6

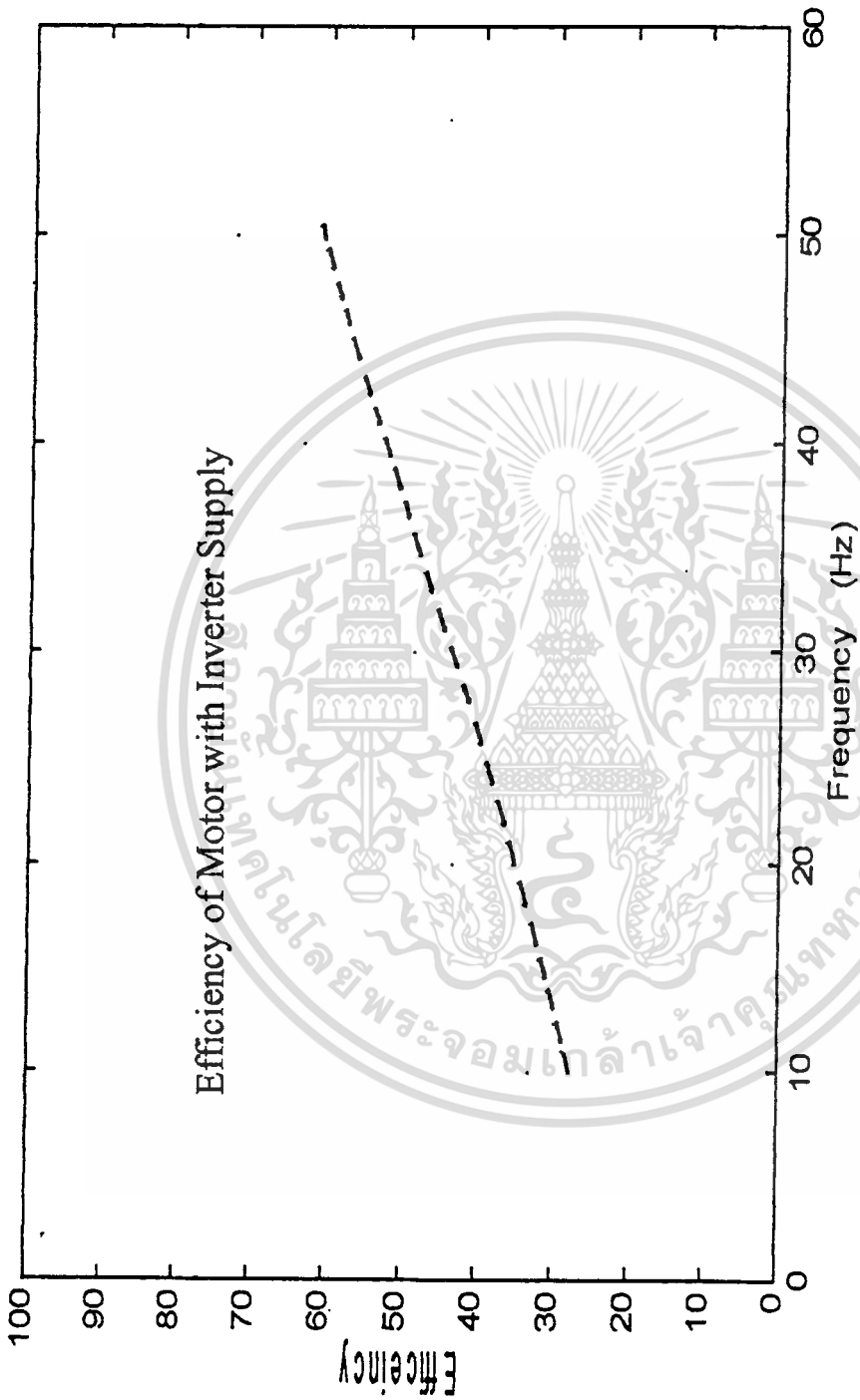
ความถี่ 80 Hz

| กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าอินคันทันมอเตอร์ |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|---------------------------------------|-------|-------|-----|------|---------------|-------|------|------|-----|------------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                        |       |       |     |      | กระแสไฟฟ้า(A) |       |      |      |     | กำลังไฟฟ้า |      |
| V peak                                | V rms | % THD | HM  | CF   | I peak        | I rms | %THD | HM   | CF  | kW         | kVA  |
| 30                                    | 413   | 25.8  | 107 | 1.53 | 2.14          | 1.41  | -    | 0.15 | 1.5 | 0.8        | 1.02 |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |     |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      | </  |            |      |

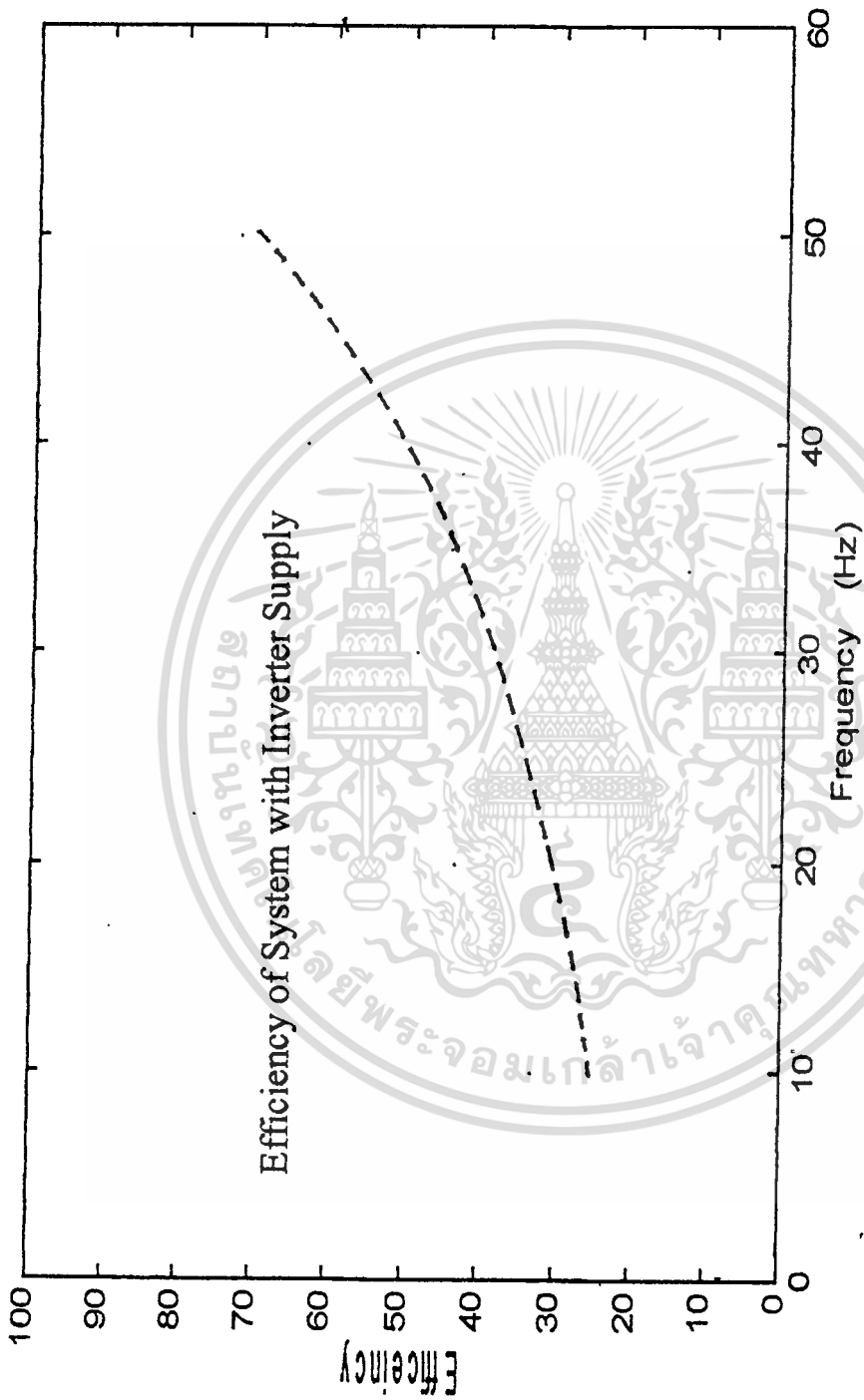
| กำลังไฟฟ้าที่เข้าอินเวอร์เตอร์ |      | กำลังไฟฟ้าที่อินดักชันมอเตอร์ |                     |                        |              |                      |                         |                     |
|--------------------------------|------|-------------------------------|---------------------|------------------------|--------------|----------------------|-------------------------|---------------------|
| ความถี่ (Hz)                   | kW   | kW                            | ความเร็วรอบ (r.p.m) | ความเร็วเชิงมุม(rad/s) | แรงบิด (N-m) | กำลังไฟฟ้าที่ แกน(W) | ประสิทธิภาพ มอเตอร์ (%) | ประสิทธิภาพ ระบบ(%) |
| 10                             | 0.1  | 0.09                          | 290                 | 30.37                  | 0.88         | 26.73                | 29.7                    | 26.73               |
| 20                             | 0.29 | 0.25                          | 585                 | 61.26                  | 1.47         | 90.05                | 36.02                   | 31.05               |
| 30                             | 0.41 | 0.30                          | 877                 | 91.84                  | 1.47         | 135.0                | 45.0                    | 32.92               |
| 40                             | 0.5  | 0.40                          | 1173                | 122.84                 | 1.962        | 241.01               | 60.25                   | 48.20               |
| 50                             | 0.54 | 0.52                          | 1470                | 153.94                 | 2.45         | 377.15               | 72.53                   | 69.84               |

ตารางที่ 6.34

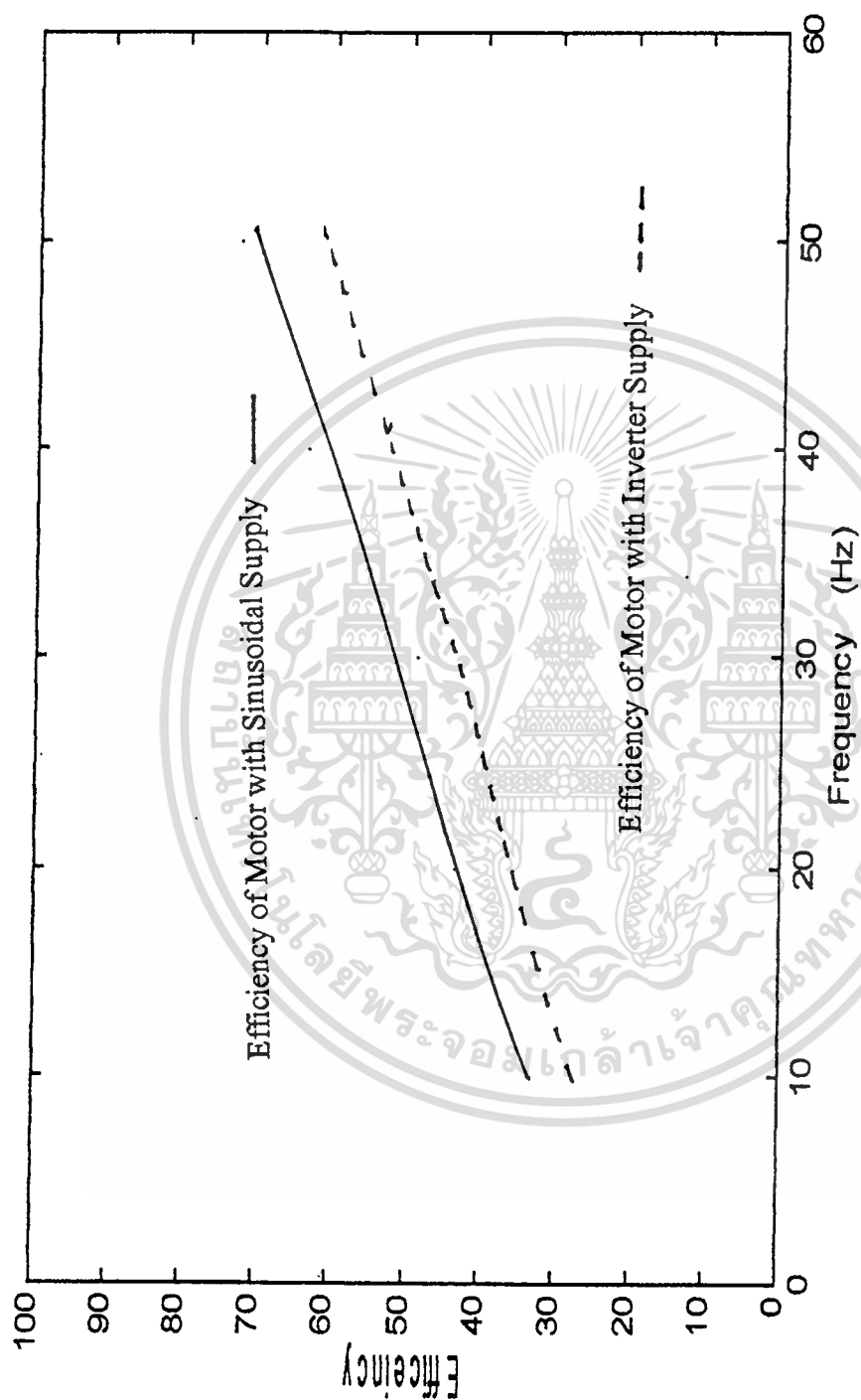
แสดงประสิทธิภาพของอินดักชันมอเตอร์เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์เป็นตัวควบคุมความเร็วรอบ



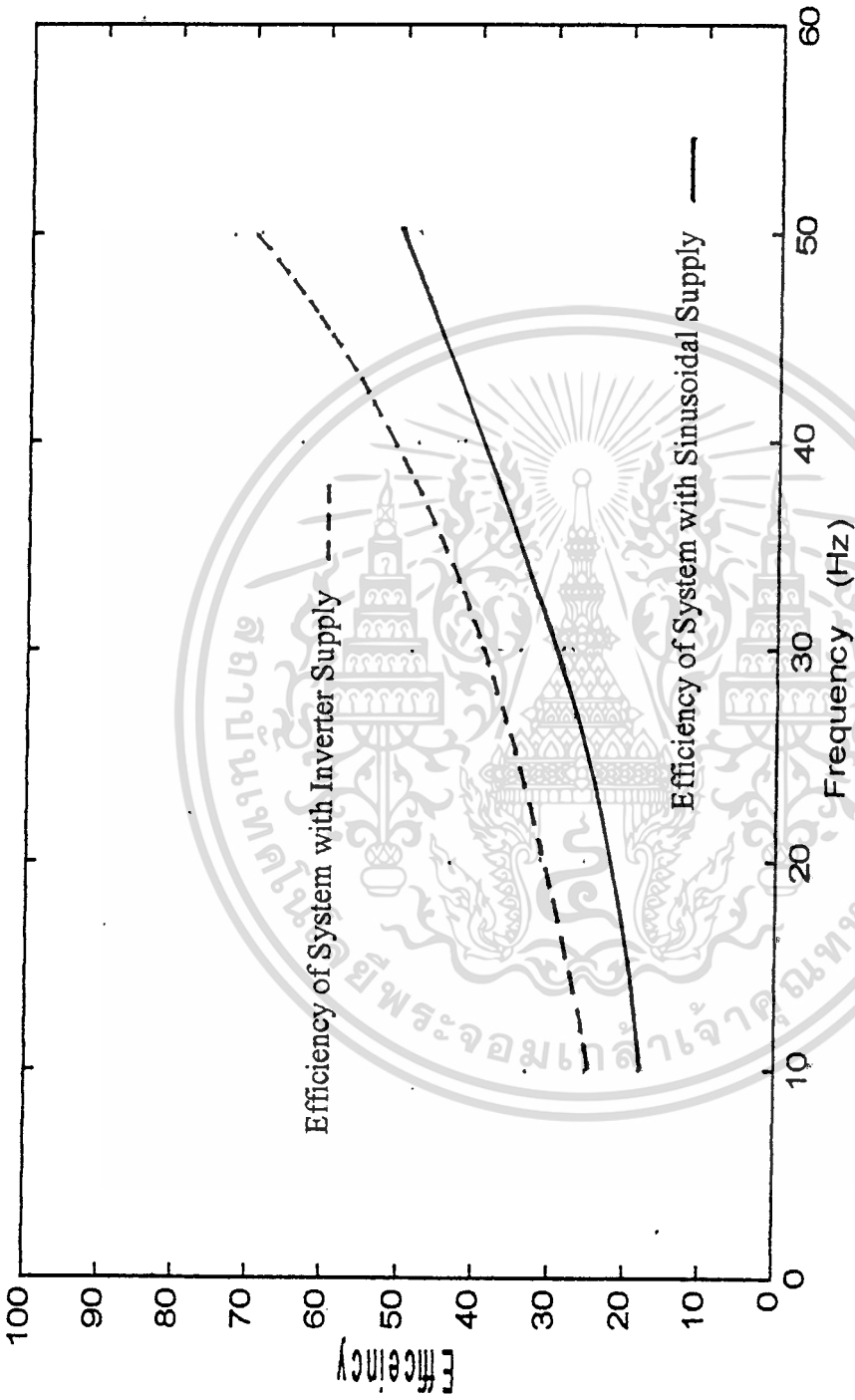
รูปที่ 6.5 ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำจากการจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 6.6 ประสิทธิภาพของระบบจากการจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 6.7 ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำจากแหล่งจ่ายสองระบบ



รูปที่ 6.8 ประสิทธิภาพของระบบจากแหล่งจ่ายสองระบบ

### สรุปผลการทดลองบทที่ 6

จากการทดลองจะพบว่าประสิทธิภาพของระบบและตัวมอเตอร์จากการจ่ายโดยอินเวอร์เตอร์และเงินเนอร์เรเตอร์จะมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นที่ความถี่สูง(พิจารณาเฉพาะช่วง 10 - 50 Hz) และประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่จ่ายโดยเงินเนอร์เรเตอร์จะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าเนื่องจากไม่มีผลจากการสูญเสียเนื่องจากฮาร์โมนิกส์(Harmonic loss) แต่เมื่อมองโดยรวมแล้วประสิทธิภาพของระบบที่จ่ายโดยเงินเนอร์เรเตอร์จะแย่กว่าเนื่องจากการมีการสูญเสียที่หลายส่วนคือในมอเตอร์กระแสตรงและการสูญเสียจากการหมุนของมอเตอร์กระแสตรงอีกทั้งยังสูญเสียในตัวเงินเนอร์เรเตอร์ด้วย



## ผลของ ฮาร์โมนิกส์ ต่อแรงบิด

ในการปรับความเร็วรอบ ( $N_r$ ) ของ มอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่นิยมใช้มากที่สุด คือ การปรับความถี่ (frequency) ที่จ่ายให้แก่มอเตอร์โดยการใช้ อินเวอร์เตอร์ แต่หลักการของ อินเวอร์เตอร์ ในการปรับเปลี่ยนความถี่เราต้องทำการปรับศักดาไฟฟ้า (Voltage) ให้เพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นอัตราส่วนเดียวกันกับความถี่ เพื่อให้ฟลักซ์มีค่าคงที่ เพื่อให้ เครื่องจักร สามารถทำงานได้เหมือนในสภาวะปกติ ถ้าเราทำการปรับแต่ความถี่ โดยไม่มีการปรับศักดาไฟฟ้าผลที่ได้คือ

1. ลดความถี่ลงโดยไม่ปรับศักดาไฟฟ้า จะมีผลทำให้ ฟลักซ์ เพิ่มขึ้น ซึ่งนั่นหมายความว่า วงจรแม่เหล็กของ มอเตอร์เหนี่ยวนำ จะเกิดการอิ่มตัวทางแม่เหล็ก (Saturation) ที่มากขึ้นตามความถี่ที่ลดลง
2. เพิ่มความถี่ขึ้นโดยไม่ปรับศักดาไฟฟ้า จะมีผลทำให้ ฟลักซ์ มีค่าต่ำลง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อแรงบิด (torque) ลดลง ซึ่งจะไม่สามารถขับเคลื่อนมอเตอร์ได้

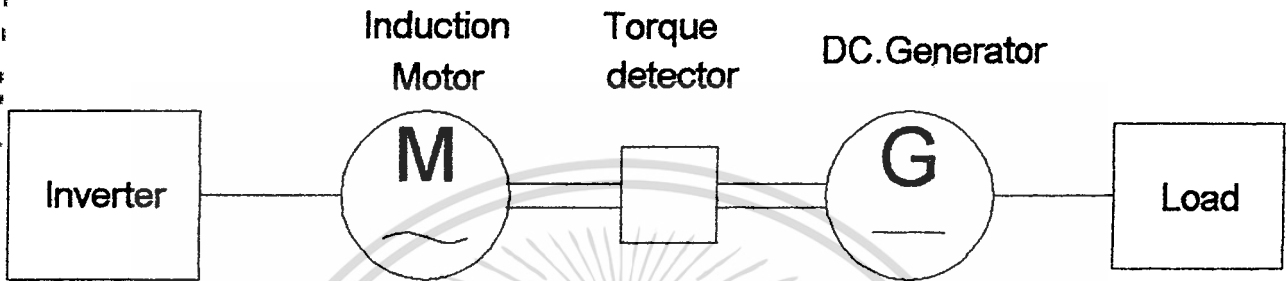
พิสูจน์ได้จากสมการ

$$\frac{V}{f} = 4.44 N \phi$$

ในการใช้งาน อินเวอร์เตอร์ จะพบว่าจะให้แรงบิด (torque) คงที่ที่โหลดเท่าเดิม หรือเราเรียกการใช้งานนี้ว่า  $\frac{V}{f}$  คงที่

แต่ในความเป็นจริงเราจะพบว่า แรงบิด จะไม่คงที่เสมอไป เนื่องจากการใช้งานที่ความเร็วรอบที่สูงขึ้น จะเกิดการสูญเสียเนื่องจาก การหมุน (rotational losses) ที่เพิ่มขึ้น และเนื่องจากผลของ ฮาร์โมนิกส์ ลำดับต่าง ๆ

การทดลองเพื่อพิสูจน์ว่า ในความเป็นจริง  $\frac{V}{f}$  ที่ความถี่ต่าง ๆ ให้ แรงบิด ที่ไม่คงที่  
ต่อวงจรดังรูปที่ 7.1



รูปการทดลองที่ 7.1

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. อินเวอร์เตอร์
2. วาริเอค(variac) 1 เฟส
3. โหลดหลอดไฟ
4. เครื่องมือวัดแรงบิดและฮาร์โมนิกส์

เราจะทำการปรับแรงบิดที่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่ ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ โดยจากสมการ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

$$T = k_{\phi} I_a$$

$k$  = ค่าคงที่

$I_a$  = กระแสอาร์มเจอร์ (Amp)

$\phi$  = flux ที่จ่ายแก่ DC Gen. (Wb)

$\therefore$  เราสามารถกำหนดให้แรงบิดของเครื่องกำเนิดให้คงที่ โดยการกำหนดให้  $I_a$  คงที่ (ในที่นี้ให้เท่ากับ 0.2 A) และให้  $\phi$  คงที่ โดยการต่อเครื่องกำเนิดชนิด แยกขดลวดกระตุ้น โดยในที่นี้ให้  $I_f = 0.3$  A แล้วอ่านค่าจาก เครื่องวัดแรงบิด(torque Detector) ว่าค่าแรงบิดของ มอเตอร์เหนี่ยวนำ จะเปลี่ยนแปลงอย่างไร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 10 Hz

| กำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์เข้าอินตักซ์มอเตอร์ |       |       |    |      |        |               |      |     |      |      |      |            |      |     |
|-----------------------------------------------|-------|-------|----|------|--------|---------------|------|-----|------|------|------|------------|------|-----|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                                |       |       |    |      |        | กระแสไฟฟ้า(A) |      |     |      |      |      | กำลังไฟฟ้า |      |     |
| V peak                                        | V rms | % THD | HM | CF   | I peak | I rms         | %THD | HM  | CF   | kW   | kVA  | kVAR       | PF   | DPF |
| 146                                           | 101   | 6.2   | 7  | 1.45 | 2.85   | 1.96          | 1.07 | 0.2 | 1.46 | 0.23 | 0.34 | 0.24       | 0.67 | 0.7 |

ความถี่ 20 Hz

| กำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์เข้าอินดักชันมอเตอร์ |       |       |    |      |        |               |      |      |      |      |     |            |      |      |
|------------------------------------------------|-------|-------|----|------|--------|---------------|------|------|------|------|-----|------------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                                 |       |       |    |      |        | กระแสไฟฟ้า(A) |      |      |      |      |     | กำลังไฟฟ้า |      |      |
| V peak                                         | V rms | % THD | HM | CF   | I peak | I rms         | %THD | HM   | CF   | kW   | kVA | kVAR       | PF   | DPF  |
| 251                                            | 249   | 5.2   | 8  | 1.02 | 2.22   | 1.63          | 7.8  | 0.13 | 1.36 | 0.22 | 0.7 | 0.420      | 0.31 | 0.47 |

ความเร็วรอบ 591 r.p.m.

แรงบิด 0.88 N-m

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |     | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|-----|----------------|------|
|                      | %               | V   | %              | A    |
| 1                    | 99.8            | 172 | 99.7           | 1.6  |
| 3                    |                 |     |                |      |
| 5                    | 3.8             | 7   | 6.1            | 0.1  |
| 7                    | 2.5             | 5   | 3.4            | 0.06 |
| 9                    |                 |     |                |      |
| 11                   |                 |     |                |      |
| 13                   |                 |     |                |      |

ตารางที่ 7.2 แสดงผลการทดลองบทที่ 7

ความถี่ 30 Hz

| กำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์เข้าอินตักซ์มอเตอร์ |       |       |    |      |               |       |      |     |     |            |      |      |     |      |
|-----------------------------------------------|-------|-------|----|------|---------------|-------|------|-----|-----|------------|------|------|-----|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                                |       |       |    |      | กระแสไฟฟ้า(A) |       |      |     |     | กำลังไฟฟ้า |      |      |     |      |
| V peak                                        | V rms | % THD | HM | CF   | I peak        | I rms | %THD | HM  | CF  | kW         | kVA  | kVAR | PF  | DPF  |
| 350                                           | 307   | 4.1   | 12 | 1.14 | 2.15          | 1.52  | 6.7  | 0.1 | 1.4 | 0.24       | 0.81 | 0.57 | 0.3 | 0.41 |

ความเร็วรอบ 888 r.p.m.

แรงบิด 0.98 N-m

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |     | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|-----|----------------|------|
|                      | %               | V   | %              | A    |
| 1                    | 99.8            | 243 | 99.7           | 1.49 |
| 3                    |                 |     |                |      |
| 5                    | 2.4             | 6.0 | 4.6            | 0.06 |
| 7                    | 2.3             | 6.0 | 4.1            | 0.06 |
| 9                    |                 |     |                |      |
| 11                   |                 |     |                |      |
| 13                   |                 |     |                |      |

ตารางที่ 7.3 แสดงผลการทดลองบทที่ 7

ความถี่ 40 Hz

| กำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์เข้าอินดักชั่นมอเตอร์ |       |       |    |      |               |       |      |      |      |            |      |      |
|-------------------------------------------------|-------|-------|----|------|---------------|-------|------|------|------|------------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                                  |       |       |    |      | กระแสไฟฟ้า(A) |       |      |      |      | กำลังไฟฟ้า |      |      |
| V peak                                          | V rms | % THD | HM | CF   | I peak        | I rms | %THD | HM   | CF   | kW         | kVA  | PF   |
| 457                                             | 358   | 4.0   | 12 | 1.27 | 2.15          | 1.5   | 6.1  | 0.09 | 1.44 | 0.29       | 0.92 | 0.31 |
| 0.37                                            |       |       |    |      |               |       |      |      |      |            |      |      |

ความถี่ 50Hz

| กำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์เข้าอินคักชั่นมอเตอร์ |       |       |    |      |        |               |      |      |      |      |      |
|-------------------------------------------------|-------|-------|----|------|--------|---------------|------|------|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                                  |       |       |    |      |        | กระแสไฟฟ้า(A) |      |      |      |      |      |
| V peak                                          | V rms | % THD | HM | CF   | I peak | I rms         | %THD | HM   | CF   | kW   | kVA  |
| 598                                             | 420   | 21.7  | 89 | 1.43 | 2.24   | 1.51          | 9.4  | 0.13 | 1.49 | 0.34 | 1.08 |

ความเร็วรอบ 1484 r.p.m.

แรงบิด 1.373 N-m

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |     | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|-----|----------------|------|
|                      | %               | V   | %              | A    |
| 1                    | 97.6            | 397 | 99.6           | 1.48 |
| 3                    |                 |     |                |      |
| 5                    |                 |     | 2.7            | 0.04 |
| 7                    | 2.8             | 11  | 4.2            | 0.06 |
| 9                    |                 |     |                |      |
| 11                   |                 |     |                |      |
| 13                   |                 |     |                |      |

ตารางที่ 7.5 แสดงผลการทดลองบทที่ 7

ความถี่ 60 Hz

| กำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์เข้าอินดักชันมอเตอร์ |       |       |    |      |        |               |      |     |     |            |      |      |
|------------------------------------------------|-------|-------|----|------|--------|---------------|------|-----|-----|------------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                                 |       |       |    |      |        | กระแสไฟฟ้า(A) |      |     |     | กำลังไฟฟ้า |      |      |
| V peak                                         | V rms | % THD | HM | CF   | I peak | I rms         | %THD | HM  | CF  | kW         | kVA  | PF   |
| 596                                            | 413   | 22    | 90 | 1.45 | 1.76   | 1.13          | 7.2  | 3.7 | 1.5 | 0.31       | 0.8  | 0.38 |
|                                                |       |       |    |      |        |               |      |     |     |            | 0.69 | 0.43 |

ความเร็วรอบ 1778 r.p.m.

แรงบิด 1.57 N-m

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |     | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|-----|----------------|------|
|                      | %               | V   | %              | A    |
| 1                    | 97.6            | 400 | 99.7           | 1.11 |
| 3                    |                 |     |                |      |
| 5                    |                 |     | 3.8            | 0.04 |
| 7                    | 3.3             | 14  | 4.4            | 0.05 |
| 9                    |                 |     |                |      |
| 11                   |                 |     |                |      |
| 13                   |                 |     |                |      |

ตารางที่ 7.6 แสดงผลการทดลองบทที่ 7

ความถี่ 70 Hz

| กำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์เข้าอิน덕ชันมอเตอร์ |       |       |     |      |        |               |      |      |     |      |      |      |
|----------------------------------------------|-------|-------|-----|------|--------|---------------|------|------|-----|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                               |       |       |     |      |        | กระแสไฟฟ้า(A) |      |      |     |      |      |      |
| V peak                                       | V rms | % THD | HM  | CF   | I peak | I rms         | %THD | HM   | CF  | kW   | kVA  | kVAR |
| 664                                          | 420   | 30.6  | 128 | 1.59 | 1.43   | 0.99          | 8.2  | 0.08 | 1.6 | 0.33 | 0.71 | 0.57 |
| ความเร็วรอบ 2069 r.p.m.                      |       |       |     |      |        | กำลังไฟฟ้า    |      |      |     |      |      |      |
| แรงบิด 1.67 N-m                              |       |       |     |      |        | PF            |      |      |     |      |      |      |
|                                              |       |       |     |      |        | DPF           |      |      |     |      |      |      |
|                                              |       |       |     |      |        | 0.5           |      |      |     |      |      |      |

| ลำดับ<br>สารโมโนคัล | แรงดันไฟฟ้า (V) |     | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|---------------------|-----------------|-----|----------------|------|
|                     | %               | V   | %              | A    |
| 1                   | 95.2            | 399 | 99.7           | 0.95 |
| 3                   |                 |     |                |      |
| 5                   |                 |     | 3.6            | 0.04 |
| 7                   |                 |     |                |      |
| 9                   |                 |     |                |      |
| 11                  | 3.1             | 13  |                |      |
| 13                  | 3.7             | 16  |                |      |

ตารางที่ 7.7 แสดงผลการทดลองบทที่ 7

ความถี่ 80 Hz

| กำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์เข้าอินคักชั่นมอเตอร์ |       |       |     |      |        |               |      |      |     |            |      |      |
|-------------------------------------------------|-------|-------|-----|------|--------|---------------|------|------|-----|------------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                                  |       |       |     |      |        | กระแสไฟฟ้า(A) |      |      |     | กำลังไฟฟ้า |      |      |
| V peak                                          | V rms | % THD | HM  | CF   | I peak | I rms         | %THD | HM   | CF  | kW         | kVA  | PF   |
| 639                                             | 413   | 26.1  | 108 | 1.55 | 1.28   | 0.92          | 6.9  | 0.04 | 1.4 | 0.37       | 0.66 | 0.55 |

ความเร็วรอบ 2358 r.p.m

แรงบิด 1.67 N-m

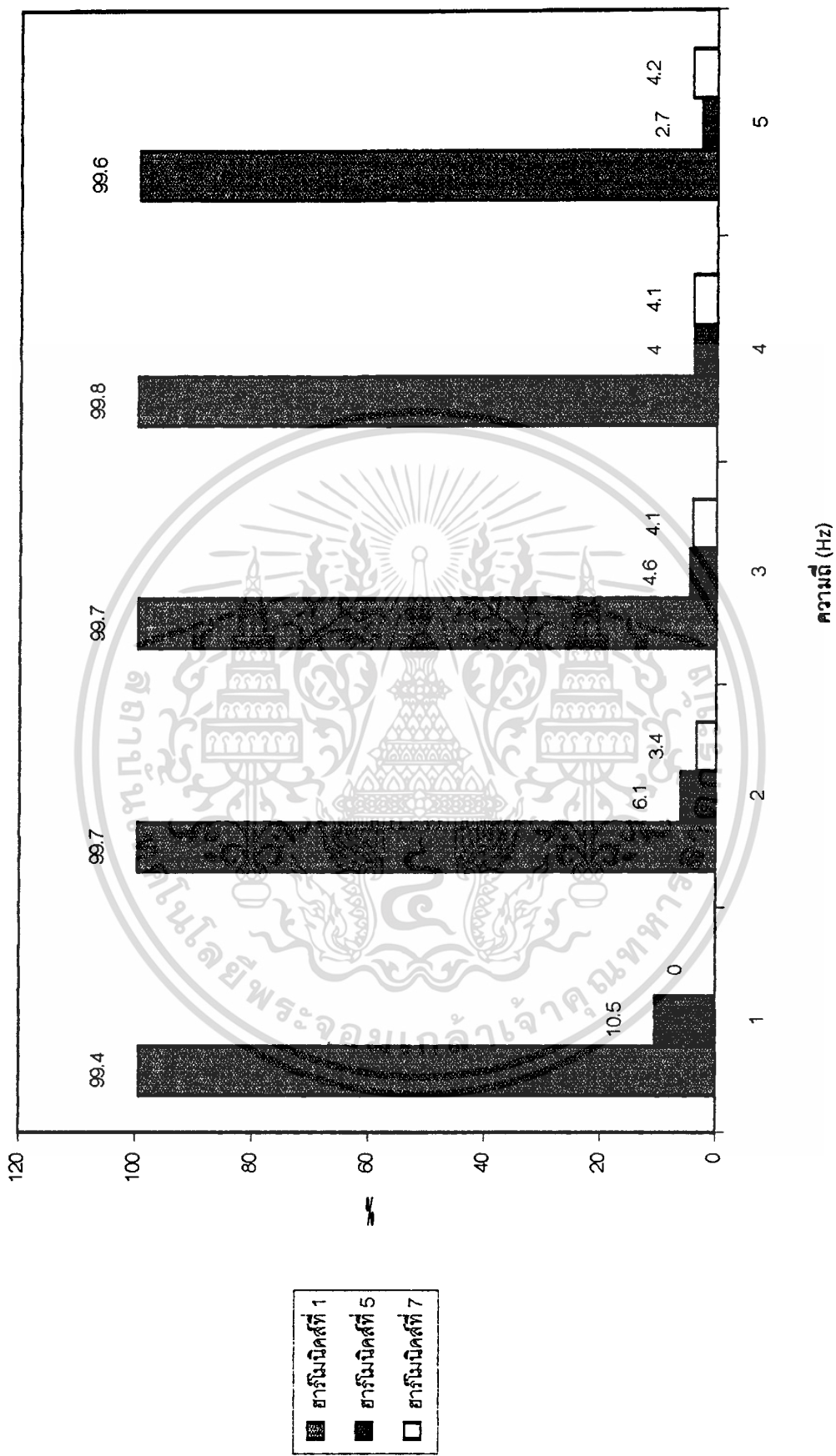
| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |     | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|-----|----------------|------|
|                      | %               | V   | %              | A    |
| 1                    | 96.5            | 399 | 99.8           | 0.9  |
| 3                    |                 |     |                |      |
| 5                    |                 |     | 2.4            | 0.02 |
| 7                    |                 |     |                |      |
| 9                    |                 |     |                |      |
| 11                   | 3.1             | 13  | 1.5            | 0.01 |
| 13                   | 3.8             | 14  |                |      |

ตารางที่ 7.8 แสดงผลการทดลองบทที่ 7

| ความถี่ (Hz) | % ลำดับฮาร์โมนิกส์กระแสไฟฟ้า |      |     |
|--------------|------------------------------|------|-----|
|              | 1                            | 5    | 7   |
| 10           | 99.4                         | 10.5 | 0   |
| 20           | 99.7                         | 6.1  | 3.4 |
| 30           | 99.7                         | 4.6  | 4.1 |
| 40           | 99.8                         | 4.0  | 4.1 |
| 50           | 99.6                         | 2.7  | 4.2 |

ตารางที่ 7.9 แสดงลำดับฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ต่างๆ





รูปที่ 7.2 เปอร์เซนต์ยารีนินิคส์ที่ความถี่ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### สรุปผลการทดลองบทที่ 7

จากผลการทดลองที่ได้สรุปว่า แรงบิดจะไม่คงที่ทุกๆย่านความถี่ เนื่องจากที่ความถี่สูงจะมีผลของ การสูญเสียเนื่องจากการหมุนมากขึ้น หรือถ้ามองจากกระแสฮาร์โมนิกส์ที่มีผลต่อแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า(mmf) จะพบว่าที่ความถี่ต่ำจะมีกระแสฮาร์โมนิกส์ที่หักล้างกับส่วนมูลฐาน (Fundamental) ซึ่งได้แก่ฮาร์โมนิกลำดับที่ 5 , 11 หรือ ที่  $(6n-1)$  เรียกว่าซีควเอนลบ(negative sequence) แต่ที่ความถี่สูงจะพบว่ามีการเพิ่มขึ้นของกระแสฮาร์โมนิกส์ที่เสริมกันกับส่วนมูลฐาน ซึ่งได้แก่ฮาร์โมนิกลำดับที่ 7 , 13 หรือที่  $(6n+1)$  เรียกว่าซีควเอนบวก ( positive sequence) และมีการลดลงของซีควเอนลบ ทำให้แรงบิดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่ความถี่สูง

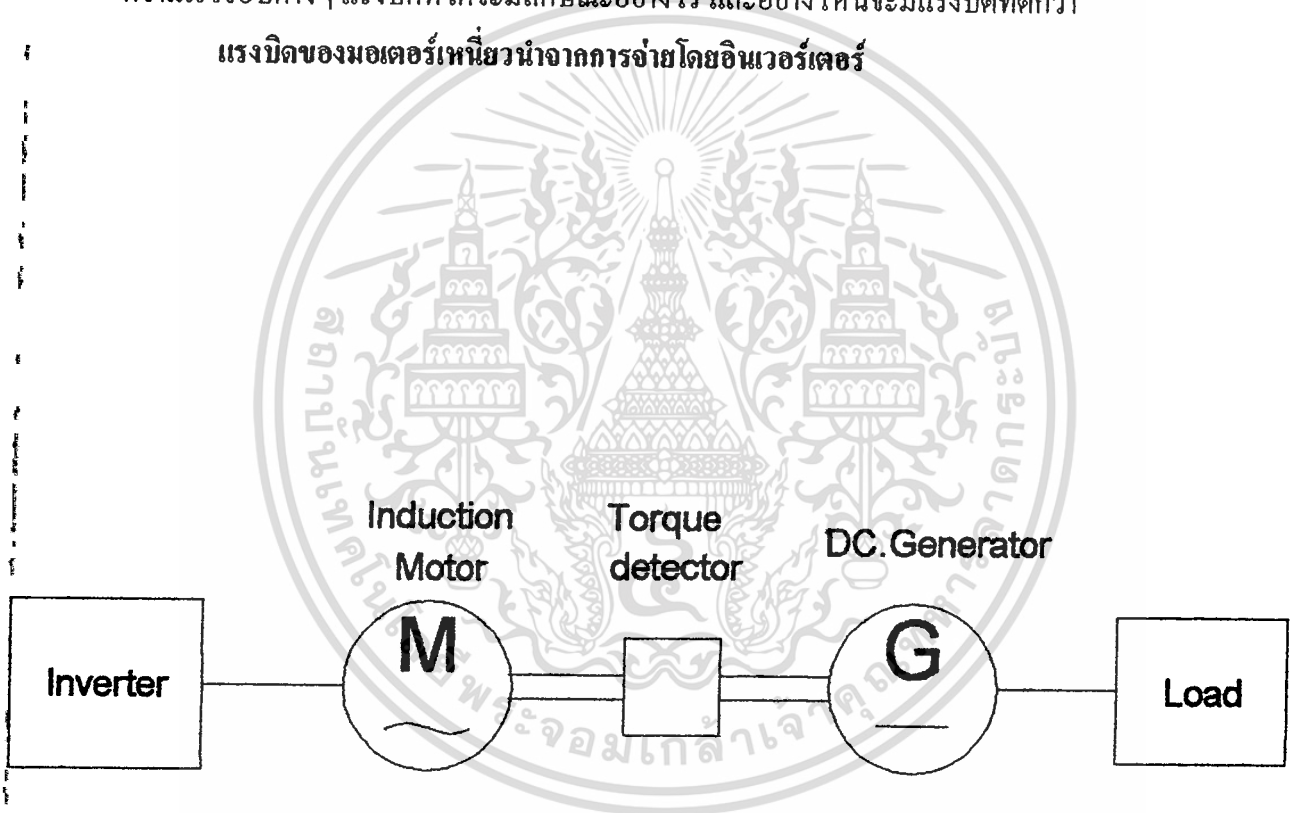


## บทที่ 8

### แรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในส่วนการศึกษาในบทที่ 8 นี้เราจะศึกษาถึงพฤติกรรมของมอเตอร์เหนี่ยวนำว่า แรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำจากการจ่ายกำลังงานโดยอินเวอร์เตอร์กับการจ่ายจากระบบไฟฟ้าทั่วไป ที่ความเร็วรอบต่างๆ แรงบิดที่ได้จะมีลักษณะอย่างไร และอย่างไรหนจะมีแรงบิดที่ดีกว่า

**แรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำจากการจ่ายโดยอินเวอร์เตอร์**



**รูปที่ 8.1 การขับมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยอินเวอร์เตอร์**

### วิธีทดลอง

1. ต่อวงจรดังรูปที่ 8.1 จำแนกค่าไฟฟ้าและความถี่ที่พิกัด ให้แก่มอเตอร์(380 V 50 Hz สตาร์)
2. ใส่โหลดหลอดไฟขนาด 200 วัตต์ ทำการวัดค่าดังในตาราง
3. เพิ่มโหลดหลอดไฟขึ้นไปเรื่อยๆจนถึงจุดที่แรงบิดสูงสุด
4. นำค่าแรงบิดที่ได้นำมาพล็อตกราฟเทียบกับความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ



โหลด 200 W

| กำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์เข้าอินตักชั่นมอเตอร์ |       |       |      |      |        |               |      |      |      |      |     |
|-------------------------------------------------|-------|-------|------|------|--------|---------------|------|------|------|------|-----|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                                  |       |       |      |      |        | กระแสไฟฟ้า(A) |      |      |      |      |     |
| V peak                                          | V rms | % THD | HM   | CF   | I peak | I rms         | %THD | HM   | CF   | kW   | kVA |
| 610                                             | 427   | 21.8  | 90.0 | 1.43 | 2.31   | 1.59          | 9.40 | 0.15 | 1.50 | 0.54 | 1.2 |

ความเร็วรอบ 1472 r.p.m.

แรงบิด 2.55 N-m

กำลังไฟฟ้า

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |      | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|------|----------------|------|
|                      | %               | V    | %              | A    |
| 1                    | 97.6            | 403  | 99.7           | 1.56 |
| 3                    |                 |      |                |      |
| 5                    |                 |      |                |      |
| 7                    | 2.9             | 12.0 | 4.60           | 0.06 |
| 9                    |                 |      |                |      |
| 11                   |                 |      |                |      |
| 13                   |                 |      |                |      |

ตารางที่ 8.1 แสดงผลการทดลองบทที่ 8

| กำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์เข้าอินตักชั่นมอเตอร์ |       |       |    |      |               |       |      |      |      |            |      |      |      |      |
|-------------------------------------------------|-------|-------|----|------|---------------|-------|------|------|------|------------|------|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                                  |       |       |    |      | กระแสไฟฟ้า(A) |       |      |      |      | กำลังไฟฟ้า |      |      |      |      |
| V peak                                          | V rms | % THD | HM | CF   | I peak        | I rms | %THD | HM   | CF   | kW         | kVA  | kVAR | PF   | DPF  |
| 590                                             | 424   | 20.3  | 82 | 1.40 | 2.45          | 1.68  | 7.90 | 0.12 | 1.50 | 0.63       | 1.23 | 0.97 | 0.53 | 0.55 |

แรงบิด 2.943 N-m

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |     | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|-----|----------------|------|
|                      | %               | V   | %              | A    |
| 1                    | 98.0            | 402 | 99.8           | 1.63 |
| 3                    |                 |     |                |      |
| 5                    | 1.90            | 6.0 | 3.7            | 0.06 |
| 7                    | 1.70            | 6.0 | 3.50           | 0.05 |
| 9                    |                 |     |                |      |
| 11                   | 1.20            | 5.0 |                |      |
| 13                   | 1.40            | 6.0 |                |      |

## ตารางที่ 8.2 แสดงผลการทดลองบทที่ 8

โหลด 400 W

| กำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์เข้าอินคักชันมอเตอร์ |       |       |      |      |        |               |      |      |      |      |      |
|------------------------------------------------|-------|-------|------|------|--------|---------------|------|------|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                                 |       |       |      |      |        | กระแสไฟฟ้า(A) |      |      |      |      |      |
| V peak                                         | V rms | % THD | HM   | CF   | I peak | I rms         | %THD | HM   | CF   | kW   | kVA  |
| 601                                            | 424   | 20.8  | 21.2 | 1.43 | 2.48   | 1.7           | 8.3  | 0.15 | 1.50 | 0.76 | 1.27 |
|                                                |       |       |      |      |        | กำลังไฟฟ้า    |      |      |      |      |      |
|                                                |       |       |      |      |        | kVAR          | PF   | DPF  |      |      |      |
|                                                |       |       |      |      |        | 0.44          | 0.61 | 0.76 |      |      |      |

ความเร็วรอบ 1453 r.p.m.

แรงบิด 3.73 N-m

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |      | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|------|----------------|------|
|                      | %               | V    | %              | A    |
| 1                    | 99.7            | 402  | 99.6           | 1.65 |
| 3                    |                 |      |                |      |
| 5                    |                 |      |                |      |
| 7                    | 2.80            | 11.0 | 5.2            | 0.09 |
| 9                    | 4.20            | 18.0 |                |      |
| 11                   | 12.0            | 49.0 |                |      |
| 13                   |                 |      |                |      |

ตารางที่ 8.3 แสดงผลการทดลองบทที่ 8

โหลด 500 W

| กำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์เข้าอินคักชันมอเตอร์ |       |       |      |      |        |               |      |      |      |      |      |
|------------------------------------------------|-------|-------|------|------|--------|---------------|------|------|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                                 |       |       |      |      |        | กระแสไฟฟ้า(A) |      |      |      |      |      |
| V peak                                         | V rms | % THD | HM   | CF   | I peak | I rms         | %THD | HM   | CF   | kW   | kVA  |
| 600                                            | 420   | 21.4  | 88.0 | 1.43 | 2.63   | 1.79          | 8.40 | 0.14 | 1.50 | 0.85 | 1.31 |
| กำลังไฟฟ้า                                     |       |       |      |      |        |               |      |      |      | PF   | DPF  |
|                                                |       |       |      |      |        |               |      |      |      | 0.66 | 0.72 |

ความเร็วรอบ 1440 r.p.m.

แรงบิด 4.22 N-m

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |      | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|------|----------------|------|
|                      | %               | V    | %              | A    |
| 1                    | 97.6            | 400  | 99.6           | 1071 |
| 3                    |                 |      |                |      |
| 5                    |                 |      |                |      |
| 7                    | 2.60            | 11.0 | 5.20           | 0.09 |
| 9                    | 10.3            | 18.0 |                |      |
| 11                   | 12.1            | 49.0 |                |      |
| 13                   |                 |      |                |      |

ตารางที่ 8.4 แสดงผลการทดลองบทที่ 8

โหลด 600 W

| กำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์เข้าอินคัลชันมอเตอร์ |       |       |      |      |        |               |      |      |      |      |      |      |
|------------------------------------------------|-------|-------|------|------|--------|---------------|------|------|------|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                                 |       |       |      |      |        | กระแสไฟฟ้า(A) |      |      |      |      |      |      |
| V peak                                         | V rms | % THD | HM   | CF   | I peak | I rms         | %THD | HM   | CF   | kW   | kVA  | kVAR |
| 600                                            | 422   | 21.5  | 88.0 | 1.43 | 2.83   | 1.84          | 7.50 | 0.16 | 1.45 | 0.94 | 1.38 | 0.84 |
|                                                |       |       |      |      |        |               |      |      |      | PF   | DPF  |      |
|                                                |       |       |      |      |        |               |      |      |      | 0.69 | 0.74 |      |

ความเร็วรอบ 1432 r.p.m.

แรงบิด 4.9 N-m

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |      | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|------|----------------|------|
|                      | %               | V    | %              | A    |
| 1                    | 97.6            | 400  | 99.8           | 1086 |
| 3                    |                 |      |                |      |
| 5                    |                 |      |                |      |
| 7                    | 2.8             | 10.0 | 5.40           | 0.10 |
| 9                    | 4.40            | 18.0 |                |      |
| 11                   | 12.1            | 47.0 |                |      |
| 13                   |                 |      |                |      |

ตารางที่ 8.5 แสดงผลการทดลองบทที่ 8

โหลด 700 W

| กำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์เข้าอินตักชั่นมอเตอร์ |       |       |      |      |        |               |      |      |      |      |      |
|-------------------------------------------------|-------|-------|------|------|--------|---------------|------|------|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                                  |       |       |      |      |        | กระแสไฟฟ้า(A) |      |      |      |      |      |
| V peak                                          | V rms | % THD | HM   | CF   | I peak | I rms         | %THD | HM   | CF   | kW   | kVA  |
| 601                                             | 420   | 22.0  | 90.0 | 1.42 | 3.0    | 2.03          | 9.0  | 0.16 | 1.50 | 1.06 | 1.48 |
| กำลังไฟฟ้า                                      |       |       |      |      |        |               |      |      |      | kVAR | PF   |
|                                                 |       |       |      |      |        |               |      |      |      | 0.91 | 0.72 |
|                                                 |       |       |      |      |        |               |      |      |      |      | 0.75 |

ความเร็วรอบ 1427 r.p.m.

แรงบิด 5.5 N-m

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |      | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|------|----------------|------|
|                      | %               | V    | %              | A    |
| 1                    | 97.6            | 400  | 99.8           | 2.01 |
| 3                    |                 |      |                |      |
| 5                    |                 |      |                |      |
| 7                    | 2.90            | 11   | 5.10           | 0.10 |
| 9                    | 4.20            | 17.0 |                |      |
| 11                   | 11.1            | 46.0 |                |      |
| 13                   |                 |      |                |      |

ตารางที่ 8.6 แสดงผลการทดลองบทที่ 8

โหลด 800 W

| กำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์เข้าอินตักซ์มอเตอร์ |       |       |      |      |        |               |      |      |      |      |      |            |
|-----------------------------------------------|-------|-------|------|------|--------|---------------|------|------|------|------|------|------------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                                |       |       |      |      |        | กระแสไฟฟ้า(A) |      |      |      |      |      | กำลังไฟฟ้า |
| V peak                                        | V rms | % THD | HM   | CF   | I peak | I rms         | %THD | HM   | CF   | kW   | kVA  | PF         |
| 596                                           | 422   | 21.6  | 88.0 | 1.42 | 3.05   | 2.09          | 8.8  | 0.18 | 1.46 | 1.18 | 1.56 | 0.76       |
| กำลังไฟฟ้า                                    |       |       |      |      |        |               |      |      |      |      |      |            |
| DPF                                           |       |       |      |      |        |               |      |      |      |      |      |            |
| 0.81                                          |       |       |      |      |        |               |      |      |      |      |      |            |

ความเร็วรอบ 1413 rpm.

แรงบิด 5.98 N-m

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิคส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |      | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|------|----------------|------|
|                      | %               | V    | %              | A    |
| 1                    | 97.7            | 400  | 99.8           | 2.07 |
| 3                    |                 |      |                |      |
| 5                    |                 |      |                |      |
| 7                    | 2.8             | 12.0 | 4.5            | 0.09 |
| 9                    |                 |      |                |      |
| 11                   |                 |      |                |      |
| 13                   |                 |      |                |      |

ตารางที่ 8.7 แสดงผลการทดลองบทที่ 8

โหลด 900 W

| กำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์เข้าอินตักชันมอเตอร์ |       |       |      |      |               |       |      |      |      |            |      |      |      |      |
|------------------------------------------------|-------|-------|------|------|---------------|-------|------|------|------|------------|------|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                                 |       |       |      |      | กระแสไฟฟ้า(A) |       |      |      |      | กำลังไฟฟ้า |      |      |      |      |
| V peak                                         | V rms | % THD | HM   | CF   | I peak        | I rms | %THD | HM   | CF   | kW         | KVA  | kVAR | PF   | DPF  |
| 593                                            | 419   | 21.5  | 87.0 | 1.41 | 3.20          | 2.23  | 8.10 | 0.18 | 1.44 | 1.27       | 1.66 | 0.87 | 0.77 | 0.83 |

ความเร็วรอบ 1401 r.p.m.

แรงบิด 6.47 N-m

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |      | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|------|----------------|------|
|                      | %               | V    | %              | A    |
| 1                    | 97.7            | 397  | 99.7           | 2.18 |
| 3                    |                 |      |                |      |
| 5                    |                 |      |                |      |
| 7                    | 2.60            | 10.0 | 5.10           | 0.11 |
| 9                    |                 |      |                |      |
| 11                   |                 |      |                |      |
| 13                   |                 |      |                |      |

ตารางที่ 8.8 แสดงผลการทดลองบทที่ 8

โหลด 1100 W

| กำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์เข้าอินคัลชันมอเตอร์ |       |       |      |     |        |               |      |      |      |      |      |
|------------------------------------------------|-------|-------|------|-----|--------|---------------|------|------|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                                 |       |       |      |     |        | กระแสไฟฟ้า(A) |      |      |      |      |      |
| V peak                                         | V rms | % THD | HM   | CF  | I peak | I rms         | %THD | HM   | CF   | kW   | kVA  |
| 593                                            | 418   | 21.9  | 89.0 | 1.4 | 3.68   | 2.57          | 6.80 | 0.18 | 1.43 | 1.49 | 1.83 |
| กำลังไฟฟ้า                                     |       |       |      |     |        |               |      |      |      |      |      |
|                                                |       |       |      |     |        | kVAR          | PF   |      |      |      |      |
|                                                |       |       |      |     |        | 0.87          | 0.81 |      |      |      |      |
|                                                |       |       |      |     |        | 0.86          |      |      |      |      |      |

ความเร็วรอบ 1386 r.p.m.

แรงบิด 7.85 N-m

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |      | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|------|----------------|------|
|                      | %               | V    | %              | A    |
| 1                    | 97.6            | 399  | 99.8           | 2.57 |
| 3                    |                 |      |                |      |
| 5                    |                 |      |                |      |
| 7                    | 2.50            | 10.0 | 2.80           | 0.07 |
| 9                    |                 |      |                |      |
| 11                   |                 |      |                |      |
| 13                   | 2.50            | 10.0 |                |      |

ตารางที่ 8.9 แสดงผลการทดลองบทที่ 8

โหลด 1300 W

| กำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์เข้าอินคักชันมอเตอร์ |       |       |      |      |               |       |      |      |      |            |      |      |      |      |
|------------------------------------------------|-------|-------|------|------|---------------|-------|------|------|------|------------|------|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                                 |       |       |      |      | กระแสไฟฟ้า(A) |       |      |      |      | กำลังไฟฟ้า |      |      |      |      |
| V peak                                         | V rms | % THD | HM   | CF   | I peak        | I rms | %THD | HM   | CF   | kW         | kVA  | kVAR | PF   | DPF  |
| 589                                            | 420   | 21.6  | 88.0 | 1.41 | 3.90          | 2.80  | 7.10 | 0.18 | 1.41 | 1.72       | 2.05 | 0.87 | 0.84 | 0.89 |

ความเร็วรอบ 1360 r.p.m.

แรงบิด 9.025 N-m

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |      | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|------|----------------|------|
|                      | %               | V    | %              | A    |
| 1                    | 97.9            | 396  | 99.8           | 2.82 |
| 3                    | 0.4             | 2.0  |                |      |
| 5                    | 0.2             | 1.0  |                |      |
| 7                    | 2.10            | 9.0  | 3.90           | 0.11 |
| 9                    | 0.1             | 1.0  |                |      |
| 11                   | 1.70            | 7.0  |                |      |
| 13                   | 2.60            | 10.0 |                |      |

ตารางที่ 8.10 แสดงผลการทดลองบทที่ 8

โหลด 1500 W

| กำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์เข้าอินคักชั่นมอเตอร์ |       |       |      |      |               |       |      |     |      |            |      |      |      |      |
|-------------------------------------------------|-------|-------|------|------|---------------|-------|------|-----|------|------------|------|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                                  |       |       |      |      | กระแสไฟฟ้า(A) |       |      |     |      | กำลังไฟฟ้า |      |      |      |      |
| V peak                                          | V rms | % THD | HM   | CF   | I peak        | I rms | %THD | HM  | CF   | kW         | kVA  | kVAR | PF   | DPF  |
| 597                                             | 416   | 21.3  | 85.0 | 1.42 | 4.67          | 3.2   | 6.40 | 0.2 | 1.46 | 1.92       | 2.26 | 0.91 | 0.85 | 0.90 |

ความเร็วรอบ 1322 r.p.m.

แรงบิด 9.9 N-m

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |      |  | กระแสไฟฟ้า (A) |      |  |
|----------------------|-----------------|------|--|----------------|------|--|
|                      | %               | V    |  | %              | A    |  |
| 1                    | 97.7            | 395  |  | 99.8           | 3.11 |  |
| 3                    |                 |      |  |                |      |  |
| 5                    |                 |      |  |                |      |  |
| 7                    |                 |      |  | 2.80           | 0.09 |  |
| 9                    |                 |      |  |                |      |  |
| 11                   |                 |      |  |                |      |  |
| 13                   | 2.50            | 10.0 |  |                |      |  |

ตารางที่ 8.11 แสดงผลการทดลองบทที่ 8

โหลด 1700 W

| กำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์เข้าอินคัลชันมอเตอร์ |       |       |      |      |        |               |      |      |      |      |      |
|------------------------------------------------|-------|-------|------|------|--------|---------------|------|------|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                                 |       |       |      |      |        | กระแสไฟฟ้า(A) |      |      |      |      |      |
| V peak                                         | V rms | % THD | HM   | CF   | I peak | I rms         | %THD | HM   | CF   | kW   | kVA  |
| 589                                            | 415   | 21.4  | 80.0 | 1.41 | 4.85   | 3.46          | 5.50 | 0.18 | 1.40 | 2.22 | 2.52 |
|                                                |       |       |      |      |        |               |      |      |      |      | kVAR |
|                                                |       |       |      |      |        |               |      |      |      |      | 0.86 |
|                                                |       |       |      |      |        |               |      |      |      |      | PF   |
|                                                |       |       |      |      |        |               |      |      |      |      | 0.88 |
|                                                |       |       |      |      |        |               |      |      |      |      | DPF  |
|                                                |       |       |      |      |        |               |      |      |      |      | 0.93 |

ความเร็วรอบ 1284 r.p.m.

แรงบิด 11.085 N-m

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |     | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|-----|----------------|------|
|                      | %               | V   | %              | A    |
| 1                    | 97.9            | 393 | 99.9           | 3.48 |
| 3                    | 0.5             | 2.0 | 1.50           | 0.05 |
| 5                    | 2.30            | 9.0 | 1.10           | 0.04 |
| 7                    | 1.30            | 5.0 | 2.0            | 0.07 |
| 9                    |                 |     |                |      |
| 11                   | 1.50            | 6.0 | 0.60           | 0.02 |
| 13                   | 0.80            | 3.0 |                |      |

ตารางที่ 8.12 แสดงผลการทดลองบทที่ 8

โหลด 1900 W

| กำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์เข้าอินคักชั่นมอเตอร์ |       |       |      |      |               |       |      |      |      |            |      |      |      |      |
|-------------------------------------------------|-------|-------|------|------|---------------|-------|------|------|------|------------|------|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                                  |       |       |      |      | กระแสไฟฟ้า(A) |       |      |      |      | กำลังไฟฟ้า |      |      |      |      |
| V peak                                          | V rms | % THD | HM   | CF   | I peak        | I rms | %THD | HM   | CF   | kW         | kVA  | kVAR | PF   | DPF  |
| 587                                             | 416   | 21.2  | 85.0 | 1.42 | 5.71          | 3.95  | 5.70 | 0.24 | 1.44 | 2.49       | 2.84 | 0.96 | 0.88 | 0.93 |

ความเร็วรอบ 1235 r.p.m.

แรงบิด 11.97 N-m

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |     | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|-----|----------------|------|
|                      | %               | V   | %              | A    |
| 1                    | 97.7            | 392 | 99.8           | 4.0  |
| 3                    | 0.5             | 2.0 |                |      |
| 5                    | 1.80            | 7.0 |                |      |
| 7                    | 1.80            | 7.0 | 3.20           | 0.13 |
| 9                    |                 |     |                |      |
| 11                   | 0.8             | 3.0 |                |      |
| 13                   | 2.0             | 8.0 |                |      |

ตารางที่ 8.13 แสดงผลการทดลองบทที่ 8

โหลด 2000 W

| กำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์เข้าอินคันทันมอเตอร์ |       |       |      |      |               |       |      |      |      |            |      |      |
|------------------------------------------------|-------|-------|------|------|---------------|-------|------|------|------|------------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                                 |       |       |      |      | กระแสไฟฟ้า(A) |       |      |      |      | กำลังไฟฟ้า |      |      |
| V peak                                         | V rms | % THD | HM   | CF   | I peak        | I rms | %THD | HM   | CF   | kW         | kVA  | PF   |
| 595                                            | 419   | 21.2  | 85.0 | 1.42 | 6.09          | 4.22  | 4.0  | 0.18 | 1.44 | 2.80       | 3.10 | 0.89 |
| ความเร็วรอบ 1087 r.p.m.                        |       |       |      |      |               |       |      |      |      |            |      |      |
| แรงบิด 11.77 N-m                               |       |       |      |      |               |       |      |      |      |            |      |      |

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิคส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |     | กระแสไฟฟ้า (A) |     |
|----------------------|-----------------|-----|----------------|-----|
|                      | %               | V   | %              | A   |
| 1                    | 97.7            | 393 | 99.9           | 4.3 |
| 3                    |                 |     |                |     |
| 5                    | 2.6             | 9.0 |                |     |
| 7                    |                 |     |                |     |
| 9                    |                 |     |                |     |
| 11                   |                 |     |                |     |
| 13                   |                 |     |                |     |

ตารางที่ 8.14 แสดงผลการทดลองบทที่ 8

โหลด 2100 W

| กำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์เข้าอินคักชั่นมอเตอร์ |       |       |      |      |               |       |      |      |      |            |      |      |      |      |
|-------------------------------------------------|-------|-------|------|------|---------------|-------|------|------|------|------------|------|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                                  |       |       |      |      | กระแสไฟฟ้า(A) |       |      |      |      | กำลังไฟฟ้า |      |      |      |      |
| V peak                                          | V rms | % THD | HM   | CF   | I peak        | I rms | %THD | HM   | CF   | kW         | kVA  | kVAR | PF   | DPF  |
| 599                                             | 413   | 21.3  | 85.0 | 1.43 | 0.19          | 4.74  | 4.20 | 0.19 | 1.42 | 3.0        | 3.36 | 0.93 | 0.89 | 0.96 |

ความเร็วรอบ 900 r.p.m.

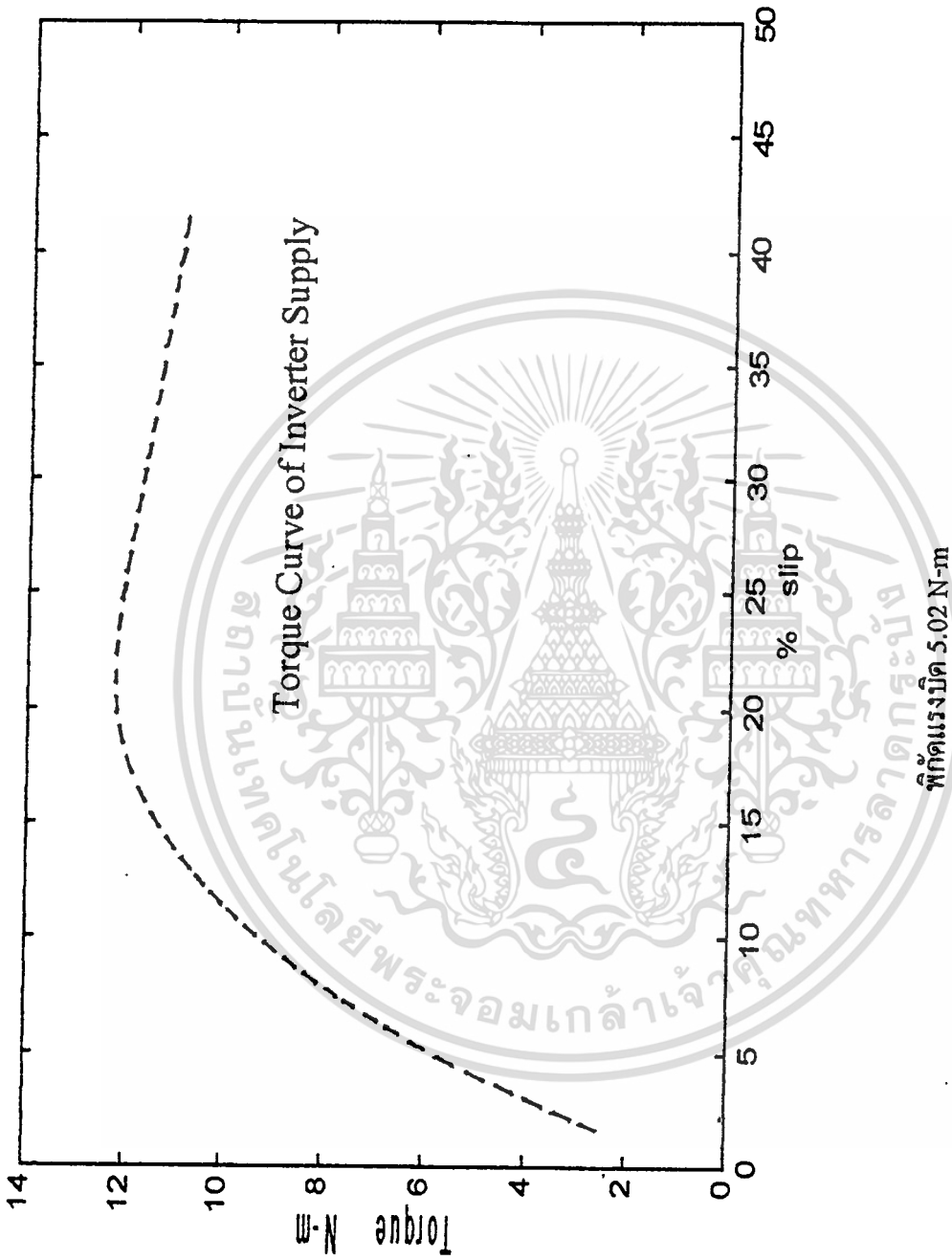
แรงบิด 10.89 N-m

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิคส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |      | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|------|----------------|------|
|                      | %               | V    | %              | A    |
| 1                    | 97.6            | 391  | 99.9           | 4.85 |
| 3                    | 0.6             | 2.0  |                |      |
| 5                    |                 |      |                |      |
| 7                    | 2.90            | 11.0 |                |      |
| 9                    |                 |      |                |      |
| 11                   |                 |      |                |      |
| 13                   |                 |      |                |      |

ตารางที่ 8.15 แสดงผลการทดลองบทที่ 8

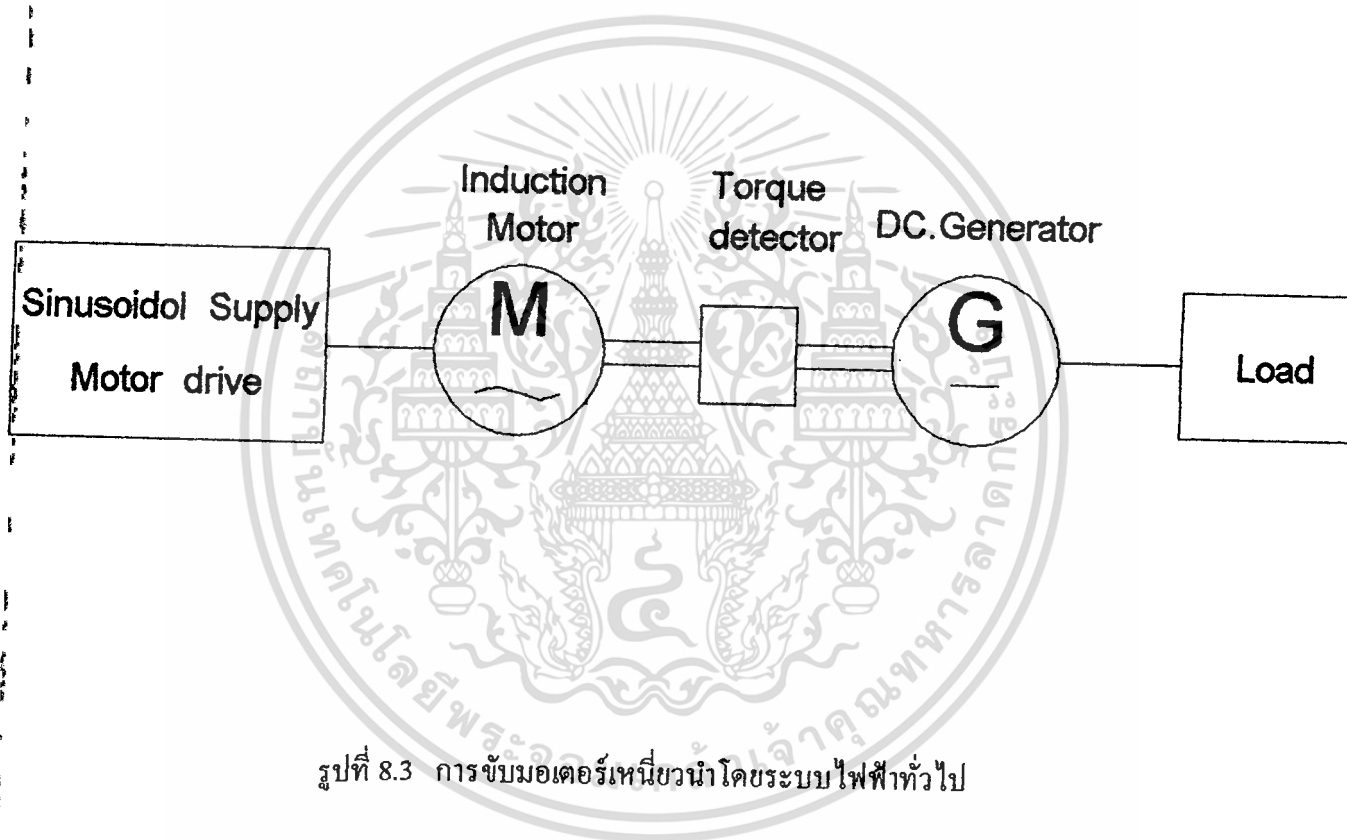
| rotor speed r.p.m. | % slip | Torque N-m |
|--------------------|--------|------------|
| 1472               | 1.87   | 2.55       |
| 1460               | 2.67   | 2.943      |
| 1453               | 3.13   | 3.73       |
| 1440               | 4      | 4.22       |
| 1432               | 4.53   | 4.9        |
| 1427               | 4.87   | 5.5        |
| 1413               | 5.8    | 5.98       |
| 1401               | 6.6    | 6.47       |
| 1389               | 7.4    | 7.85       |
| 1360               | 9.3    | 9.025      |
| 1322               | 11.87  | 9.9        |
| 1284               | 14.4   | 11.085     |
| 1235               | 17.67  | 11.97      |
| 1087               | 27.53  | 11.77      |
| 900                | 40     | 10.89      |

ตารางที่ 8.16 แรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบต่างๆเมื่อใช้ไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 8.2 แสดงแรงบิด-ความเร็วรอบจากการจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยอินเวอร์เตอร์

## แรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำจากการจ่ายระบบไฟฟ้าทั่วไป



รูปที่ 8.3 การขับมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยระบบไฟฟ้าทั่วไป

### วิธีทดลอง

1. ต่อดวงจรดังรูปที่ 8.3 จ่ายศักดาไฟฟ้าและความถี่พิกัด (380 V 50 Hz สตาร์)
2. ใส่โหลดหลอดไฟขนาด 200 วัตต์ ทำการวัดค่าดังในตาราง
3. เพิ่มโหลดหลอดไฟขึ้นไปเรื่อยๆจนถึงจุดที่แรงบิดสูงสุด
4. นำค่าแรงบิดที่ได้นำมาพล็อตกราฟเทียบกับความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

โหลด 200 W

| กำลังไฟฟ้าจากระบบเข้าอินคันทันมอเตอร์ |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |      |      |      |
|---------------------------------------|-------|-------|-----|------|---------------|-------|------|------|------|------------|------|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                        |       |       |     |      | กระแสไฟฟ้า(A) |       |      |      |      | กำลังไฟฟ้า |      |      |      |      |
| V peak                                | V rms | % THD | HM  | CF   | I peak        | I rms | %THD | HM   | CF   | kW         | kVA  | kVAR | PF   | DPF  |
| 552                                   | 388   | 0.80  | 3.0 | 1.42 | 2.13          | 1.53  | 2.70 | 0.04 | 1.40 | 0.46       | 1.04 | 0.91 | 0.45 | 0.45 |

ความเร็วรอบ 1479 r.p.m.

แรงบิด 1.864 N-m

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |     | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|-----|----------------|------|
|                      | %               | V   | %              | A    |
| 1                    | 100             | 388 | 100            | 1.53 |
| 3                    |                 |     |                |      |
| 5                    |                 |     |                |      |
| 7                    |                 |     |                |      |
| 9                    |                 |     |                |      |
| 11                   |                 |     |                |      |
| 13                   |                 |     |                |      |

ตารางที่ 8.17 แสดงผลการทดลองบทที่ 8

โหลด 400 W

| กำลังไฟฟ้าจากระบบเข้าอินดักชันมอเตอร์ |       |       |     |      |        |               |      |      |      |      |      |
|---------------------------------------|-------|-------|-----|------|--------|---------------|------|------|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                        |       |       |     |      |        | กระแสไฟฟ้า(A) |      |      |      |      |      |
| V peak                                | V rms | % THD | HM  | CF   | I peak | I rms         | %THD | HM   | CF   | kW   | KVA  |
| 553                                   | 390   | 0.8   | 3.0 | 1.42 | 2.16   | 1.53          | 3.0  | 0.05 | 1.42 | 0.55 | 1.05 |
| ความเร็วรอบ 1473 r.p.m.               |       |       |     |      |        | กำลังไฟฟ้า    |      |      |      |      |      |
| แรงบิด 2.45 N-m                       |       |       |     |      |        | kVAR          |      | PF   |      | DPF  |      |
|                                       |       |       |     |      |        | 0.90          |      | 0.53 |      | 0.54 |      |

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |     | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|-----|----------------|------|
|                      | %               | V   | %              | A    |
| 1                    | 100             | 390 | 100            | 1.53 |
| 3                    |                 |     |                |      |
| 5                    |                 |     |                |      |
| 7                    |                 |     |                |      |
| 9                    |                 |     |                |      |
| 11                   |                 |     |                |      |
| 13                   |                 |     |                |      |

ตารางที่ 8.18 แสดงผลการทดลองบทที่ 8

โหลด 600 W

| กำลังไฟฟ้าจากระบบเข้าอินคันทันมอเตอร์ |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |      |      |      |
|---------------------------------------|-------|-------|-----|------|---------------|-------|------|------|------|------------|------|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                        |       |       |     |      | กระแสไฟฟ้า(A) |       |      |      |      | กำลังไฟฟ้า |      |      |      |      |
| V peak                                | V rms | % THD | HM  | CF   | I peak        | I rms | %THD | HM   | CF   | kW         | KVA  | kVAR | PF   | DPF  |
| 553                                   | 388   | 0.80  | 3.0 | 1.42 | 2.31          | 1.63  | 3.0  | 0.05 | 1.42 | 0.78       | 1.17 | 0.88 | 0.66 | 0.67 |

ความเร็วรอบ 1450 r.p.m.

แรงบิด 3.73 N-m

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |     | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|-----|----------------|------|
|                      | %               | V   | %              | A    |
| 1                    | 100             | 388 | 100            | 1.63 |
| 3                    |                 |     |                |      |
| 5                    |                 |     |                |      |
| 7                    |                 |     |                |      |
| 9                    |                 |     |                |      |
| 11                   |                 |     |                |      |
| 13                   |                 |     |                |      |

ตารางที่ 8.19 แสดงผลการทดลองบทที่ 8

โหลด 800 W

| กำลังไฟฟ้าจากระบบเข้าอิน덕ชันมอเตอร์ |       |       |     |      |        |               |      |      |      |      |      |
|-------------------------------------|-------|-------|-----|------|--------|---------------|------|------|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                      |       |       |     |      |        | กระแสไฟฟ้า(A) |      |      |      |      |      |
| V peak                              | V rms | % THD | HM  | CF   | I peak | I rms         | %THD | HM   | CF   | kW   | kVA  |
| 553                                 | 390   | 0.90  | 3.0 | 1.42 | 2.83   | 1.99          | 2.80 | 0.06 | 1.43 | 1.01 | 1.35 |

ความเร็วรอบ 1431 r.p.m.

แรงบิด 5.10 N-m

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |     | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|-----|----------------|------|
|                      | %               | V   | %              | A    |
| 1                    | 100             | 390 | 100            | 1.99 |
| 3                    |                 |     |                |      |
| 5                    |                 |     |                |      |
| 7                    |                 |     |                |      |
| 9                    |                 |     |                |      |
| 11                   |                 |     |                |      |
| 13                   |                 |     |                |      |

ตารางที่ 8.20 แสดงผลการทดลองบทที่ 8

โหลด 1000 W

| กำลังไฟฟ้าจากระบบเข้าอินคัทรีมอเตอร์ |       |       |     |      |        |               |      |      |      |      |      |      |
|--------------------------------------|-------|-------|-----|------|--------|---------------|------|------|------|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                       |       |       |     |      |        | กระแสไฟฟ้า(A) |      |      |      |      |      |      |
| V peak                               | V rms | % THD | HM  | CF   | I peak | I rms         | %THD | HM   | CF   | kW   | KVA  | kVAR |
| 502                                  | 389   | 0.90  | 3.0 | 1.42 | 3.15   | 2.25          | 2.6  | 0.06 | 1.40 | 1.26 | 1.53 | 0.88 |
|                                      |       |       |     |      |        |               |      |      |      |      | PF   | DPF  |
|                                      |       |       |     |      |        |               |      |      |      |      | 0.82 | 0.83 |

ความเร็วรอบ 1409 r.p.m.

แรงบิด 6.18 N-m

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |     |  | กระแสไฟฟ้า (A) |      |  |
|----------------------|-----------------|-----|--|----------------|------|--|
|                      | %               | V   |  | %              | A    |  |
| 1                    | 100             | 389 |  | 100            | 2.25 |  |
| 3                    |                 |     |  |                |      |  |
| 5                    |                 |     |  |                |      |  |
| 7                    |                 |     |  |                |      |  |
| 9                    |                 |     |  |                |      |  |
| 11                   |                 |     |  |                |      |  |
| 13                   |                 |     |  |                |      |  |

ตารางที่ 8.21 แสดงผลการทดลองบทที่ 8

โหลด 1200 W

| กำลังไฟฟ้าจากระบบเข้าอินดักชันมอเตอร์ |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|---------------------------------------|-------|-------|-----|------|---------------|-------|------|------|------|------------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                        |       |       |     |      | กระแสไฟฟ้า(A) |       |      |      |      | กำลังไฟฟ้า |      |
| V peak                                | V rms | % THD | HM  | CF   | I peak        | I rms | %THD | HM   | CF   | kW         | KVA  |
| 552                                   | 389   | 0.70  | 4.0 | 1.42 | 3.54          | 2.55  | 2.80 | 0.07 | 1.39 | 1.49       | 1.74 |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |
|                                       |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |

โหลด 1400 W

| กำลังไฟฟ้าจากระบบเข้าอินดักชันมอเตอร์ |       |       |     |      |        |               |      |      |      |      |      |      |
|---------------------------------------|-------|-------|-----|------|--------|---------------|------|------|------|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                        |       |       |     |      |        | กระแสไฟฟ้า(A) |      |      |      |      |      |      |
| V peak                                | V rms | % THD | HM  | CF   | I peak | I rms         | %THD | HM   | CF   | kW   | KVA  | kVAR |
| 553                                   | 390   | 0.80  | 3.0 | 1.42 | 3.97   | 2.86          | 3.8  | 0.08 | 1.39 | 1.72 | 1.93 | 0.89 |
|                                       |       |       |     |      |        | กำลังไฟฟ้า    |      |      |      |      |      |      |
|                                       |       |       |     |      |        |               |      |      |      |      |      | DPF  |
|                                       |       |       |     |      |        |               |      |      |      |      |      | 0.90 |

ความเร็วรอบ 1344 r.p.m.

แรงบิด 8.24 N-m

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |     | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|-----|----------------|------|
|                      | %               | V   | %              | A    |
| 1                    | 100             | 390 | 100            | 2.86 |
| 3                    |                 |     |                |      |
| 5                    |                 |     |                |      |
| 7                    |                 |     |                |      |
| 9                    |                 |     |                |      |
| 11                   |                 |     |                |      |
| 13                   |                 |     |                |      |

ตารางที่ 8.23 แสดงผลการทดลองบทที่ 8

โหลด 1600 W

| กำลังไฟฟ้าจากระบบเข้าอิน덕ชันมอเตอร์ |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |      |      |      |
|-------------------------------------|-------|-------|-----|------|---------------|-------|------|------|------|------------|------|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                      |       |       |     |      | กระแสไฟฟ้า(A) |       |      |      |      | กำลังไฟฟ้า |      |      |      |      |
| V peak                              | V rms | % THD | HM  | CF   | I peak        | I rms | %THD | HM   | CF   | kW         | KVA  | kVAR | PF   | DPF  |
| 554                                 | 390   | 0.70  | 3.0 | 1.42 | 4.51          | 3.24  | 2.80 | 0.09 | 1.40 | 1.98       | 2.17 | 0.88 | 0.91 | 0.92 |

ความเร็วรอบ 1300 r.p.m.

แรงบิด 9.32 N-m

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |     |     | กระแสไฟฟ้า (A) |  |  |
|----------------------|-----------------|-----|-----|----------------|--|--|
|                      | %               | V   | %   | A              |  |  |
| 1                    | 100             | 390 | 100 | 3.24           |  |  |
| 3                    |                 |     |     |                |  |  |
| 5                    |                 |     |     |                |  |  |
| 7                    |                 |     |     |                |  |  |
| 9                    |                 |     |     |                |  |  |
| 11                   |                 |     |     |                |  |  |
| 13                   |                 |     |     |                |  |  |

ตารางที่ 8.24 แสดงผลการทดลองบทที่ 8

โหลด 1800 W

| กำลังไฟฟ้าจากระบบเข้าอินดักชันมอเตอร์ |       |       |     |      |        |               |      |      |      |      |      |
|---------------------------------------|-------|-------|-----|------|--------|---------------|------|------|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                        |       |       |     |      |        | กระแสไฟฟ้า(A) |      |      |      |      |      |
| V peak                                | V rms | % THD | HM  | CF   | I peak | I rms         | %THD | HM   | CF   | kW   | kVA  |
| 557                                   | 392   | 1.0   | 9.0 | 1.42 | 5.12   | 3.65          | 2.80 | 0.10 | 1.40 | 2.27 | 2.48 |

ความเร็วรอบ 1235 r.p.m.

แรงบิด 10.70 N-m

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |     | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|-----|----------------|------|
|                      | %               | V   | %              | A    |
| 1                    | 100             | 392 | 100            | 3.65 |
| 3                    |                 |     |                |      |
| 5                    |                 |     |                |      |
| 7                    |                 |     |                |      |
| 9                    |                 |     |                |      |
| 11                   |                 |     |                |      |
| 13                   |                 |     |                |      |

ตารางที่ 8.25 แสดงผลการทดลองบทที่ 8

โหลด 2000 W

| กำลังไฟฟ้าจากระบบเข้าอินคัลกั้นมอเตอร์ |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |      |      |      |
|----------------------------------------|-------|-------|-----|------|---------------|-------|------|------|------|------------|------|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                         |       |       |     |      | กระแสไฟฟ้า(A) |       |      |      |      | กำลังไฟฟ้า |      |      |      |      |
| V peak                                 | V rms | % THD | HM  | CF   | I peak        | I rms | %THD | HM   | CF   | kW         | KVA  | kVAR | PF   | DPF  |
| 567                                    | 393   | 0.90  | 4.0 | 1.42 | 5.75          | 4.14  | 2.70 | 0.11 | 1.40 | 2.62       | 2.80 | 0.94 | 0.94 | 0.94 |

ความเร็วรอบ 1200 r.p.m.

แรงบิด 11.58 N-m

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |     | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|-----|----------------|------|
|                      | %               | V   | %              | A    |
| 1                    | 100             | 393 | 100            | 4.14 |
| 3                    |                 |     |                |      |
| 5                    |                 |     |                |      |
| 7                    |                 |     |                |      |
| 9                    |                 |     |                |      |
| 11                   |                 |     |                |      |
| 13                   |                 |     |                |      |

ตารางที่ 8.26 แสดงผลการทดลองบทที่ 8

โหลด 2100 W

| กำลังไฟฟ้าจากระบบเข้าอินดักชันมอเตอร์ |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |      |      |      |
|---------------------------------------|-------|-------|-----|------|---------------|-------|------|------|------|------------|------|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                        |       |       |     |      | กระแสไฟฟ้า(A) |       |      |      |      | กำลังไฟฟ้า |      |      |      |      |
| V peak                                | V rms | % THD | HM  | CF   | I peak        | I rms | %THD | HM   | CF   | kW         | KVA  | kVAR | PF   | DPF  |
| 552                                   | 389   | 0.80  | 3.0 | 1.42 | 5.95          | 4.26  | 2.6  | 0.11 | 1.40 | 2.96       | 3.16 | 1.06 | 0.94 | 0.94 |

ความเร็วรอบ 1170 r.p.m.

แรงบิด 11.77 N-m

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า (V) |     | กระแสไฟฟ้า (A) |      |
|----------------------|-----------------|-----|----------------|------|
|                      | %               | V   | %              | A    |
| 1                    | 100             | 389 | 100            | 4.26 |
| 3                    |                 |     |                |      |
| 5                    |                 |     |                |      |
| 7                    |                 |     |                |      |
| 9                    |                 |     |                |      |
| 11                   |                 |     |                |      |
| 13                   |                 |     |                |      |

ตารางที่ 8.27 แสดงผลการทดลองบที่ 8

โหลด 2200 W

| กำลังไฟฟ้าจากระบบเข้าอินดักชันมอเตอร์ |       |       |     |      |               |       |      |      |      |            |      |      |      |      |
|---------------------------------------|-------|-------|-----|------|---------------|-------|------|------|------|------------|------|------|------|------|
| แรงดันไฟฟ้า(V)                        |       |       |     |      | กระแสไฟฟ้า(A) |       |      |      |      | กำลังไฟฟ้า |      |      |      |      |
| V peak                                | V rms | % THD | HM  | CF   | I peak        | I rms | %THD | HM   | CF   | kW         | KVA  | kVAR | PF   | DPF  |
| 552                                   | 389   | 0.70  | 3.0 | 1.42 | 7.23          | 5.08  | 2.10 | 0.11 | 1.40 | 3.18       | 3.40 | 1.14 | 0.94 | 0.94 |

ความเร็วรอบ 1010 r.p.m.

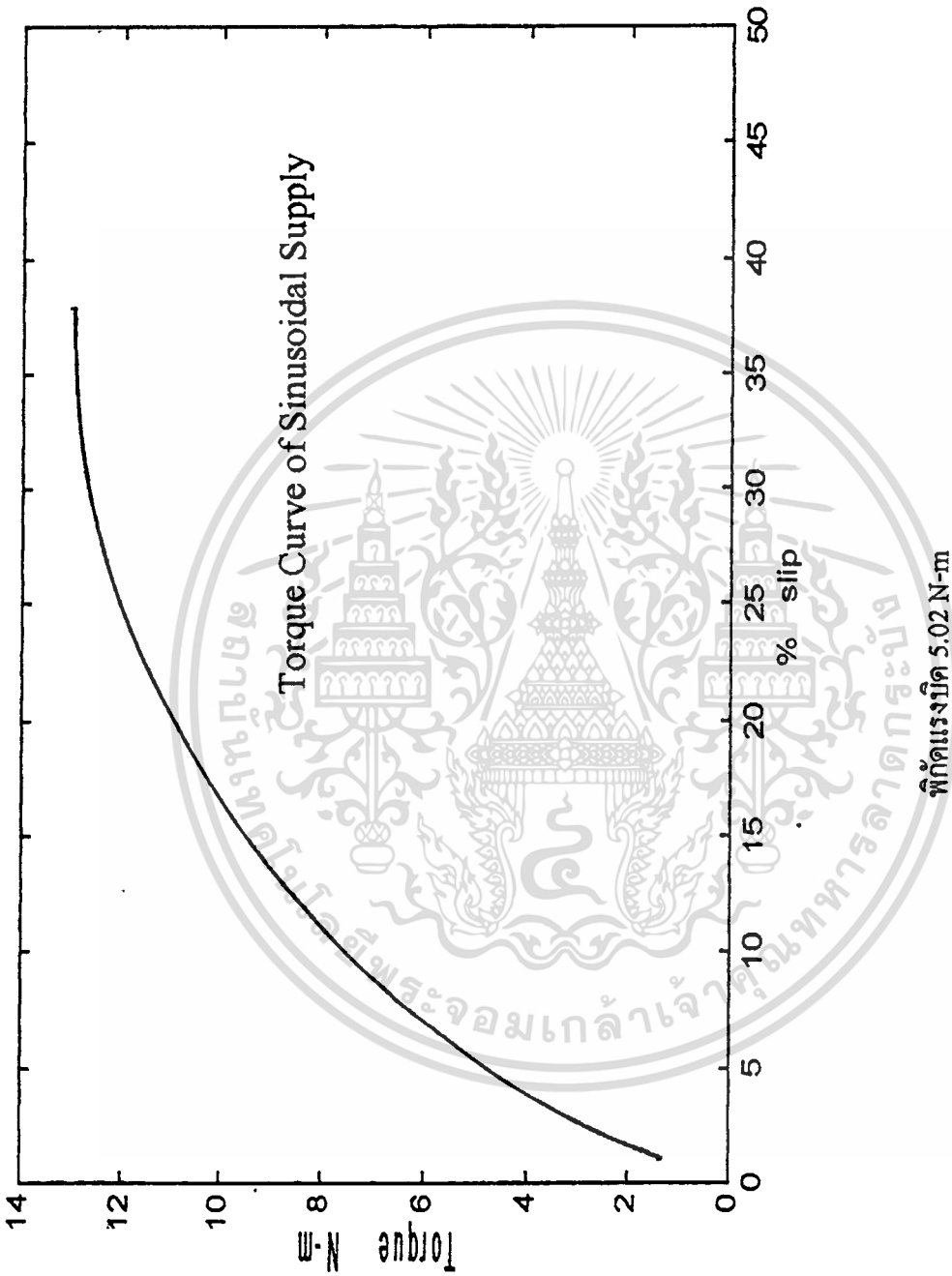
แรงบิด 12.36 N-m

| ลำดับ<br>ฮาร์โมนิกส์ | แรงดันไฟฟ้า(V) |     | กระแสไฟฟ้า(A) |      |
|----------------------|----------------|-----|---------------|------|
|                      | %              | V   | %             | A    |
| 1                    | 100            | 389 | 100           | 5.08 |
| 3                    |                |     |               |      |
| 5                    |                |     |               |      |
| 7                    |                |     |               |      |
| 9                    |                |     |               |      |
| 11                   |                |     |               |      |
| 13                   |                |     |               |      |

ตารางที่ 8.28 แสดงผลการทดลองบทที่ 8

| rotor speed r.p.m. | % slip | torque N-m |
|--------------------|--------|------------|
| 1479               | 1.4    | 1.864      |
| 1473               | 1.8    | 2.45       |
| 1450               | 3.3    | 3.73       |
| 1431               | 4.6    | 5.1        |
| 1409               | 6.07   | 6.18       |
| 1378               | 8.13   | 7.46       |
| 1344               | 10.4   | 8.24       |
| 1300               | 13.3   | 9.32       |
| 1235               | 17.67  | 10.7       |
| 1200               | 20     | 11.58      |
| 1170               | 22     | 11.77      |
| 1010               | 32.67  | 12.36      |

ตารางที่ 8.29 แรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ความเร็วรอบต่างๆเมื่อใช้ไฟฟ้าจากระบบ



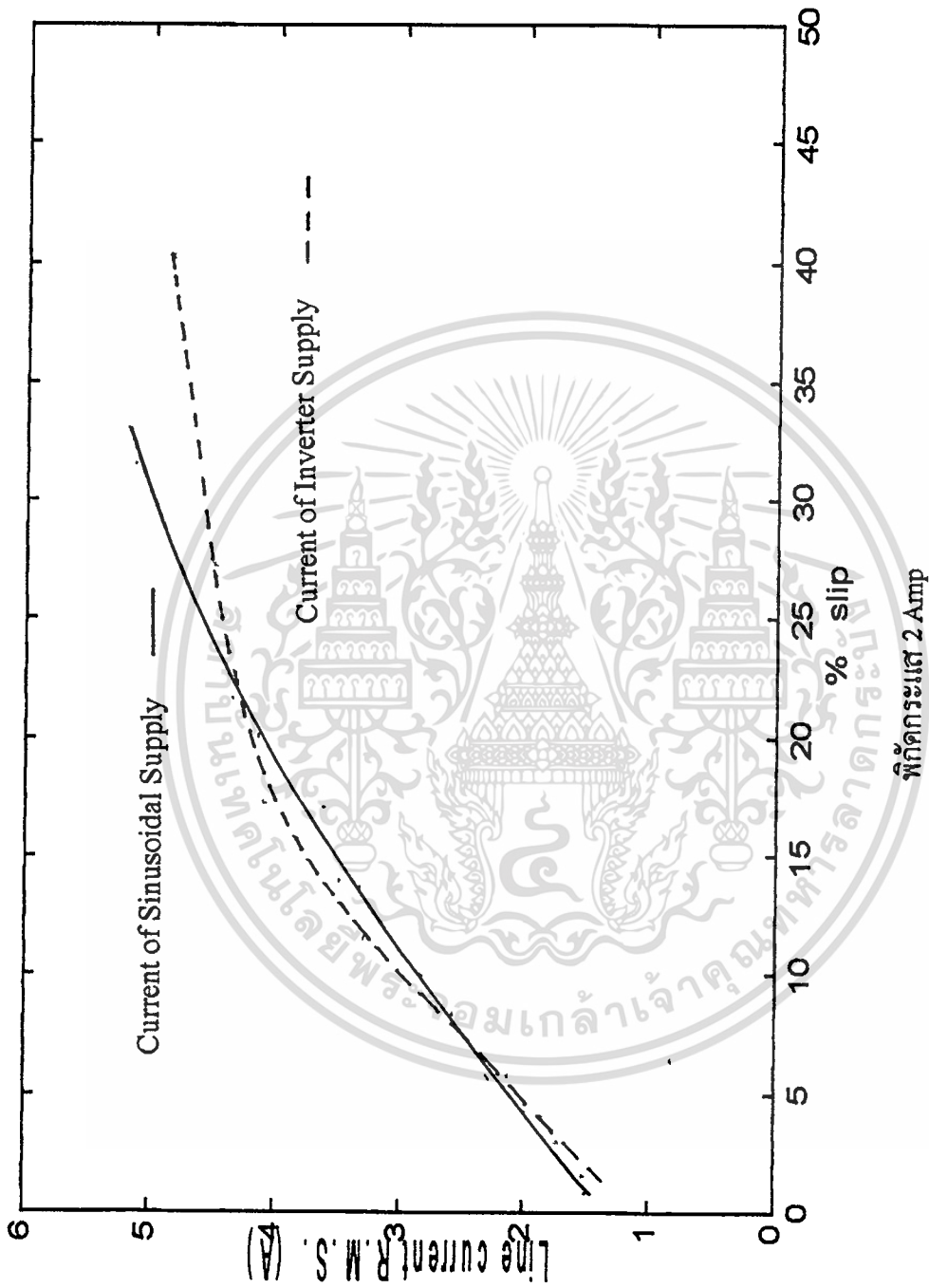
รูปที่ 8.4 แสดงแรงมิด-ความเร็วรอบจากการจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยระบบไฟฟ้า

| % Slip | กระแส<br>(Amp) | Power<br>(kW) | Apparent<br>Power(kVA) | Power Factor | ประสิทธิภาพ<br>(%) |
|--------|----------------|---------------|------------------------|--------------|--------------------|
| 0.667  | 1.48           | 0.43          | 0.53                   | 0.39         | 46                 |
| 1.4    | 1.53           | 0.46          | 1.04                   | 0.45         | 63                 |
| 1.8    | 1.53           | 0.55          | 1.05                   | 0.53         | 68.7               |
| 3.333  | 1.63           | 0.78          | 1.17                   | 0.66         | 72.6               |
| 4.6    | 1.99           | 1.01          | 1.35                   | 0.75         | 75.7               |
| 6.067  | 2.25           | 1.26          | 1.53                   | 0.82         | 72.4               |
| 8.133  | 2.55           | 1.49          | 1.74                   | 0.86         | 72.3               |
| 10.4   | 2.86           | 1.72          | 1.93                   | 0.89         | 67.4               |
| 13.333 | 3.24           | 1.98          | 2.17                   | 0.91         | 64                 |
| 17.667 | 3.65           | 2.48          | 2.48                   | 0.92         | 55.8               |
| 20     | 4.14           | 2.62          | 2.8                    | 0.94         | 55.5               |
| 22     | 4.26           | 2.96          | 3.16                   | 0.94         | 48.7               |
| 32.667 | 5.08           | 3.18          | 3.4                    | 0.94         | 41.1               |

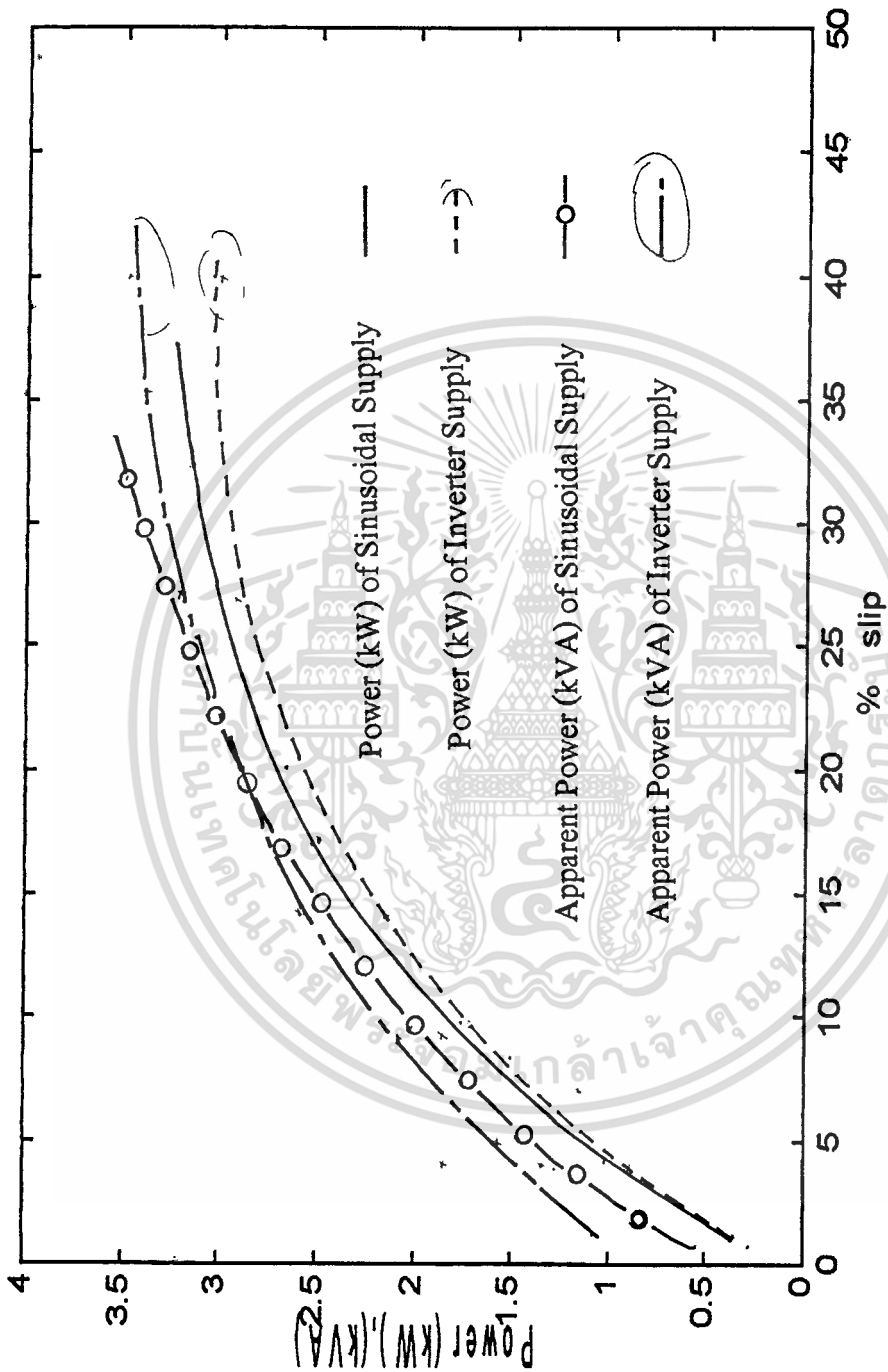
ตารางที่ 8.30 ข้อมูลของการจ่ายกำลังงานโดยระบบ

| % Slip | กระแส<br>(Amp) | Power<br>(kW) | Apparent<br>Power(kVA) | Power Factor | ประสิทธิภาพ<br>(%) |
|--------|----------------|---------------|------------------------|--------------|--------------------|
| 0.8    | 1.52           | 0.32          | 1.19                   | 0.26         | 57.5               |
| 1.867  | 1.59           | 0.54          | 1.2                    | 0.46         | 72.8               |
| 2.667  | 1.68           | 0.63          | 1.23                   | 0.53         | 71.4               |
| 3.133  | 1.7            | 0.76          | 1.27                   | 0.61         | 74.7               |
| 4      | 1.79           | 0.85          | 1.31                   | 0.66         | 74.9               |
| 4.533  | 1.84           | 0.94          | 1.38                   | 0.69         | 78.2               |
| 4.867  | 2.03           | 1.06          | 1.48                   | 0.72         | 77.5               |
| 5.8    | 2.09           | 1.18          | 1.56                   | 0.76         | 74.9               |
| 6.6    | 2.23           | 1.27          | 1.66                   | 0.77         | 74.7               |
| 7.6    | 2.57           | 1.49          | 1.83                   | 0.81         | 76.5               |
| 9.333  | 2.8            | 1.72          | 2.05                   | 0.84         | 74.7               |
| 11.867 | 3.2            | 1.92          | 2.26                   | 0.85         | 71.4               |
| 14.4   | 3.46           | 2.22          | 2.52                   | 0.88         | 67.1               |
| 17.667 | 3.95           | 2.49          | 2.84                   | 0.88         | 62                 |
| 27.333 | 4.22           | 2.8           | 3.1                    | 0.89         | 47.8               |
| 40     | 4.74           | 3             | 3.36                   | 0.89         | 34.2               |

ตารางที่ 8.31 ข้อมูลของการจ่ายกำลังงานโดยอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 8.5 แสดงการบริโภคนกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำจากแหล่งจ่ายสองระบบ

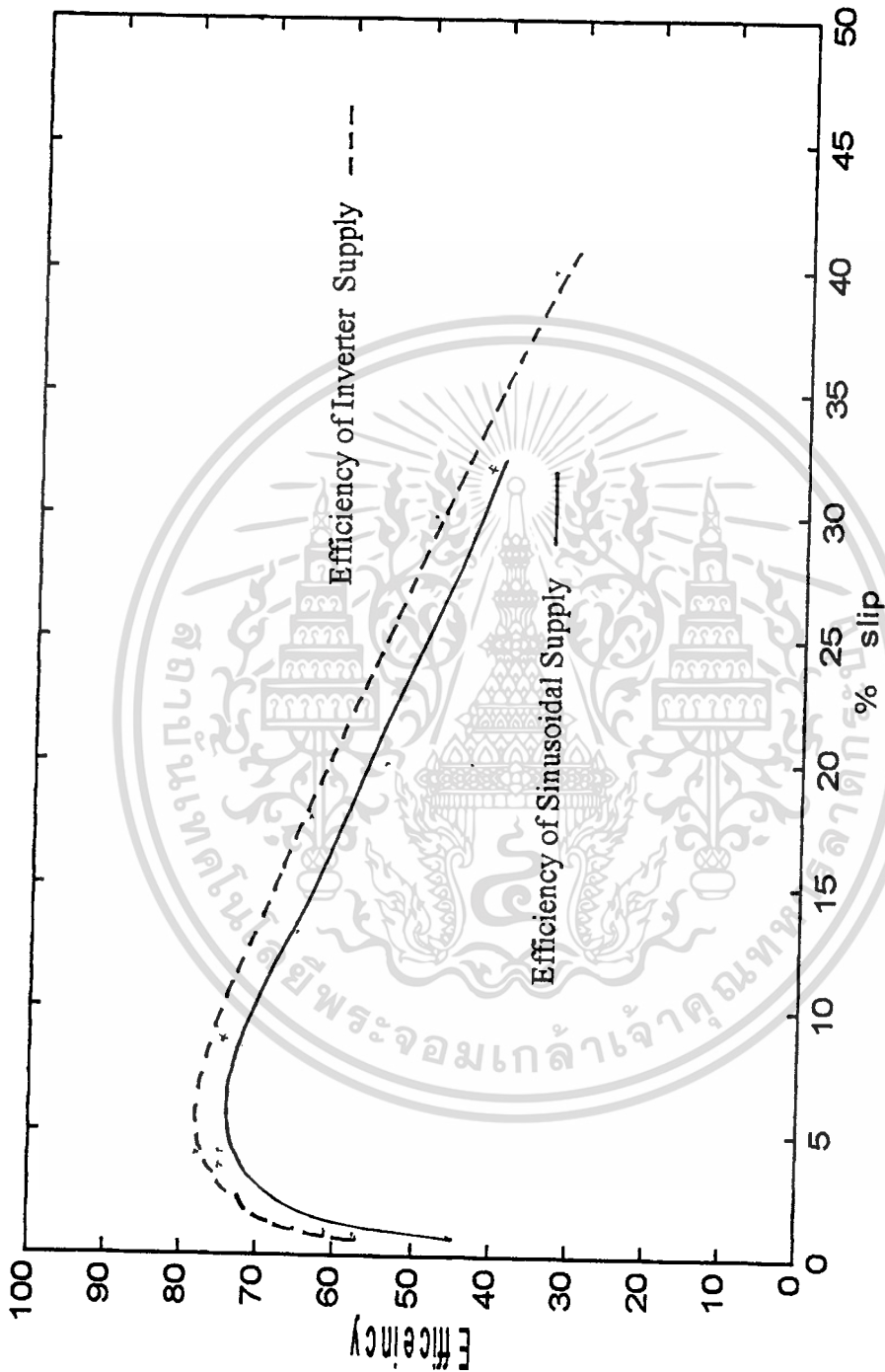


พิกัด 746 WATT

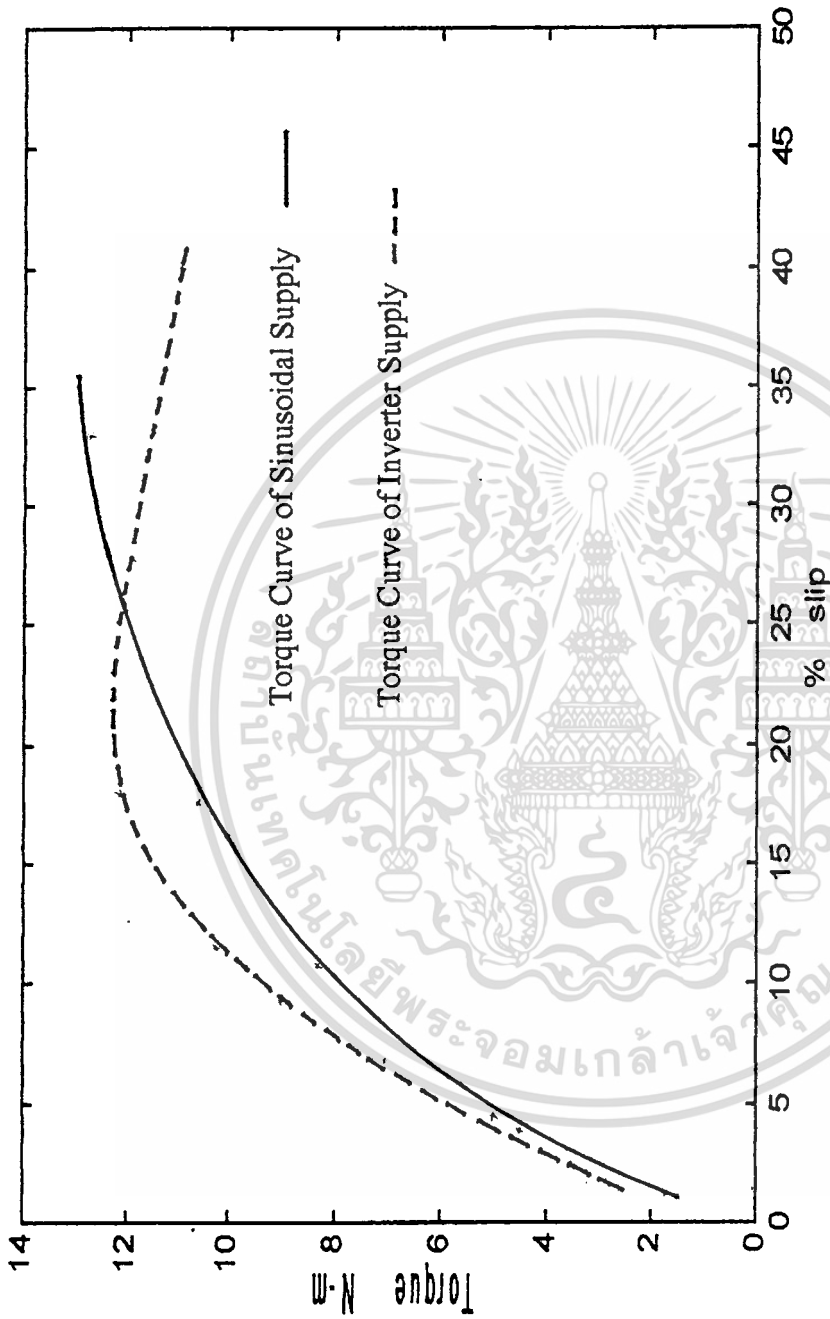
รูปที่ 8.6 แสดงการบริโภคกำลังงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำจากแหล่งจ่ายสองระบบ



รูปที่ 8.7 แสดง Power Factor ของมอเตอร์เหนี่ยวนำจากแหล่งจ่ายสองระบบ



รูปที่ 8.8 แสดงประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำจากแหล่งจ่ายสองระบบ



พิกัดแรงบิด 5.02 N-m

รูปที่ 8.9 แสดงแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำจากแหล่งจ่ายสองระบบ

### สรุปผลการทดลองบทที่ 8

จากการทดลองผลของแรงบิดที่ได้ ทำให้ทราบคุณลักษณะของแรงบิดในมอเตอร์เหนี่ยวนำจากการจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วย อินเวอร์เตอร์และจากการจ่ายด้วยระบบไฟฟ้าทั่วไป ซึ่งผลที่ได้ออกมาคือ ในช่วงการใช้งานที่ยังไม่ถึงค่าพิกัดแรงบิดที่ได้ออกมาจะใกล้เคียงกัน แต่ในช่วงที่เกินพิกัดที่ขนาดของโหลดเท่ากัน แรงบิดจากการจ่ายด้วยอินเวอร์เตอร์จะมากกว่าแรงบิดจากการจ่ายด้วยระบบไฟฟ้า แต่แรงบิดสูงสุดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ(Torque Max) ที่ได้จากระบบไฟฟ้าจะสูงกว่าที่ได้จากการจ่ายด้วยอินเวอร์เตอร์



## บทที่ 9

## แมกนีโตโมทีฟ ฟอर्स และ ฮาร์โมนิกส์ ในสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่

ในการทำงานของ มอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งทำงานภายใต้หลักการเหนี่ยวนำผ่านจาก สเตเตอร์มายังโรเตอร์ เพื่อให้เกิดกำลังและแรงบิดที่มอเตอร์ต้องการ ซึ่งในการเหนี่ยวนำหรือการถ่ายเทพลังงานจะถ่ายเทพลังงานภายในช่องอากาศ (Air Gap) ภายในรูปของฟลักซ์แม่เหล็ก ( $\phi$ ) ซึ่งเกิดจากแรงเคลื่อนไฟฟ้า (แมกนีโตโมทีฟ ฟอर्स) ซึ่งได้จากสมการ

$$mmf = \phi R$$

$$mmf = \text{แมกนีโตโมทีฟ ฟอर्स} \quad (A.Turn)$$

$$\phi = \text{ฟลักซ์แม่เหล็ก} \quad (Wb)$$

$$R = \text{ความต้านทานแม่เหล็ก} \quad (A.Turn/Wb)$$

ซึ่งเราจะพบว่า แมกนีโตโมทีฟ ฟอर्स จะเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกันกับค่า ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นในช่องอากาศเพราะว่าค่า ความต้านทานแม่เหล็ก จะมีค่าคงที่เสมอ

ซึ่งในความเป็นจริงเราไม่สามารถทำการวัดค่าฟลักซ์ในช่องอากาศได้ และ ความต้านทานแม่เหล็ก ซึ่งไม่สามารถที่จะคำนวณได้ และวัดค่าไม่ได้ เพราะฉะนั้นเราจะทำการศึกษา แมกนีโตโมทีฟ ฟอर्स ในทอมของสมการ

$$mmf = Ni$$

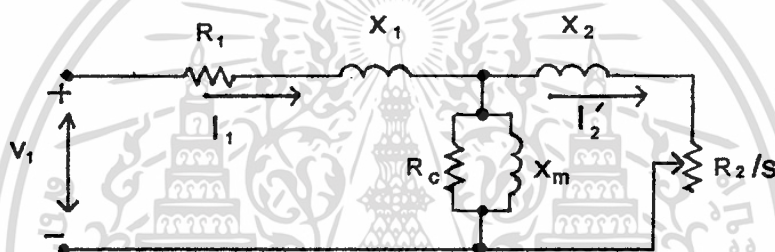
$$N = \text{จำนวนรอบ} \quad (Turn)$$

$$i = \text{กระแสไฟฟ้า} \quad (Amp)$$

ซึ่งจากสมการ เราจะพบว่า เราสามารถวัดค่ากระแสออกมาได้ ซึ่ง แมกนีโตโมทีฟ ฟอर्स จะเปลี่ยนไปในทิศทางเดียวกันกับกระแสไฟฟ้า เนื่องจากจำนวนรอบของขดลวดใน มอเตอร์เหนี่ยวนำ จะเป็นค่าคงที่เสมอ

และจากวงจรสมมูลของ มอเตอร์เหนี่ยวนำ ดังรูป เราจะพบว่าเกิด แมกนีโตโมทีฟฟอร์ส จาก กระแส 3 ส่วน ได้แก่

1. กระแสที่ สเตเตอร์ ( $I_1$ )
2. กระแสกระตุ้น ( $I_\phi$ )
3. กระแสที่ โรเตอร์ ( $I_2$ )



วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำ

แต่ในการใช้งานของ มอเตอร์เหนี่ยวนำ แมกนีโตโมทีฟ ฟอร์ส ที่เกิดขึ้นจากส่วนของกระแสที่ สเตเตอร์และที่ โรเตอร์ จะหักล้างกันจนหมด เพราะฉะนั้น แมกนีโตโมทีฟ ฟอร์ส ที่เกิดขึ้นในช่องอากาศจะมีเฉพาะส่วนของ กระแสกระตุ้น เราจึงสามารถวัดค่าของ แมกนีโตโมทีฟ ฟอร์ส ที่เกิดขึ้น ในช่องอากาศในรูปของกระแสกระตุ้น

ในการวัดค่าของกระแสกระตุ้น เราไม่สามารถวัดได้โดยตรง แต่เราจะสามารถวัดได้จากการทำงานของ มอเตอร์เหนี่ยวนำ ภายใต้อาการไร้โหลด ซึ่งจะไม่มีส่วนของกระแสที่ โรเตอร์ ซึ่ง ถ้าดูจากวงจรสมมูลจะพบว่าที่สถานะ กระแสที่ โรเตอร์ มีค่าเท่ากับศูนย์ กระแสที่ โรเตอร์ ที่วัดได้ จะมีค่าเท่ากับกระแสกระตุ้น

ในความเป็นจริงแม้เราจะให้ มอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่สถานะไร้โหลด แต่ก็ยังจะมีกระแสผ่านมายังโรเตอร์เนื่องจากการหมุนที่แกนเพลลาของมอเตอร์ยังมีการเกิดขึ้น ซึ่งก็คือแกนเพลลาของไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์เป็นโหลดของตัวเอง ซึ่งทำให้กระแสที่ สเตเตอร์ ที่วัด ได้ยังจะมีค่าของกระแสที่ โรเตอร์ ปนอยู่ด้วยจึง ไม่ใช่กระแสกระตุ้นที่แท้จริง

### มอเตอร์เหนี่ยวนำ และหม้อแปลงไฟฟ้า

ในการทำงานของ มอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งใช้หลักการการเหนี่ยวนำเราจะพบว่าหลักการ ทำงาน จะเป็นหลักการเดียวกันกับการทำงานของหม้อแปลงทุกอย่าง เราจึงนำมาประยุกต์ วัดค่า ของกระแสกระตุ้นใน มอเตอร์เหนี่ยวนำ ได้จากหม้อแปลงที่สภาวะ ไร้โหลด ซึ่งค่าที่วัดได้จะเป็น ค่าของกระแสกระตุ้นที่แท้จริงเนื่องจากไม่มีส่วนของกระแส โรเตอร์ ปนอยู่ เราจะสามารถทราบรูปแบบของ แมกนีโตโมทีฟ ฟอर्स ที่เกิดขึ้น



การทดลองบทที่ 9  
วิธีทดลอง

### AC. Generator



รูปที่ 9.1 การต่อวงจรเพื่อวัดค่ากระแสกระตุ้น

1. ต่อวงจรดังรูปที่ 9.1 (พิกัดหม้อแปลง 2000 วัตต์ , 220 /110 โวลต์)
2. จ่ายศักดาไฟฟ้าที่พิกัด 200 โวลต์ เปิดวงจรทางด้าน 110 โวลต์
3. ทำการวัดค่ากระแสกระตุ้น , กระแสฮาร์โมนิกกระตุ้นและกำลังงานไฟฟ้า บันทึกค่าลง

ในตาราง

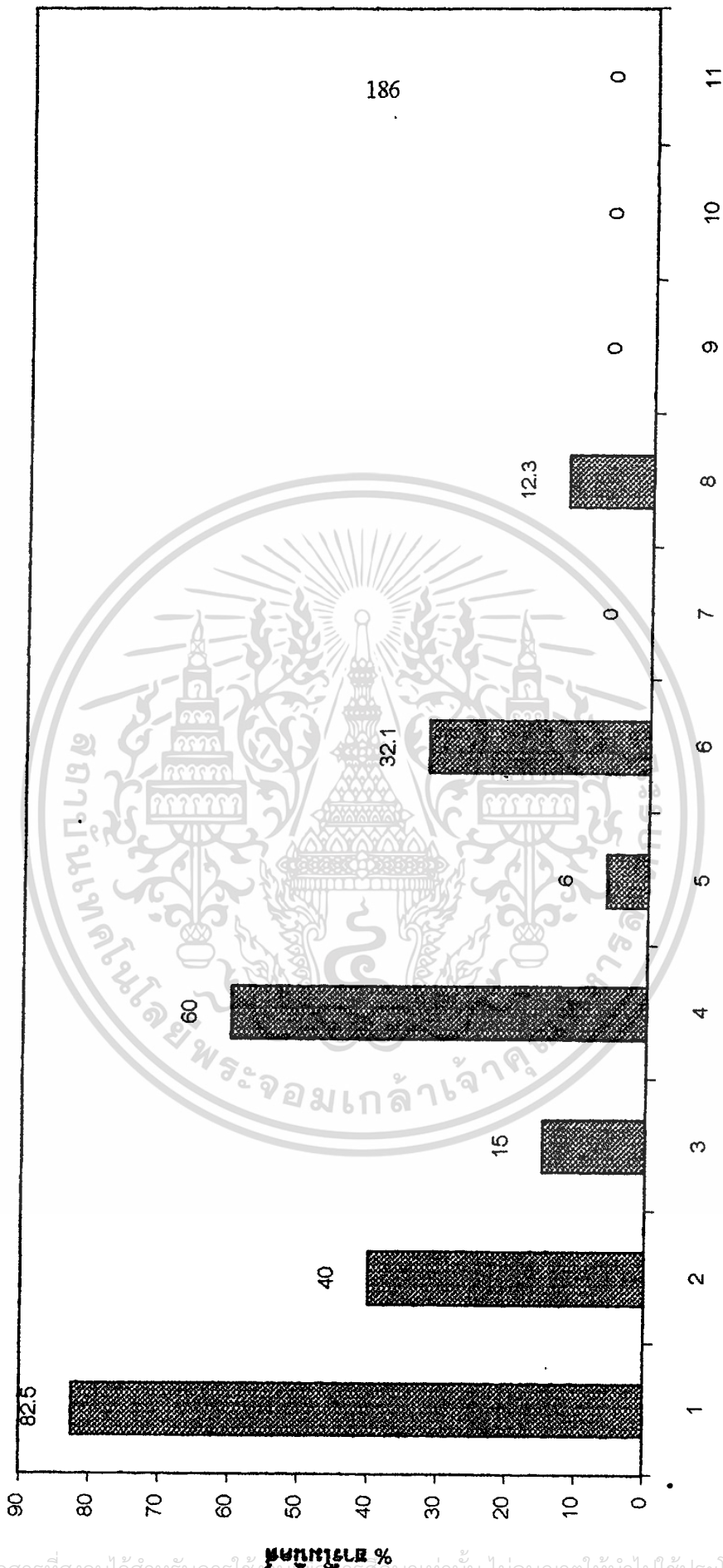
| ความถี่(Hz) | % ฮาร์โมนิกส์กระแสลำดับที่ |      |     |      |     |      |   |      |
|-------------|----------------------------|------|-----|------|-----|------|---|------|
|             | 1                          | 2    | 3   | 4    | 5   | 6    | 7 | 8    |
| 80          | 89                         | 86   | 4.5 | 46   | 0   | 19.3 | 0 | 6.9  |
| 70          | 86                         | 85   | 6   | 46.7 | 0   | 19.8 | 0 | 7.2  |
| 60          | 83.8                       | 82.5 | 6   | 49.5 | 3   | 23.2 | 0 | 8.5  |
| 50          | 82.7                       | 48.8 | 10  | 50   | 4.3 | 27   | 0 | 9    |
| 40          | 82.5                       | 40   | 15  | 60   | 6   | 32.1 | 0 | 12.3 |

ตารางที่ 9.1 แสดง % ฮาร์โมนิกส์กระแสที่ความถี่ต่างๆ

| ความถี่(Hz) | I peak (A) | I rms (A) | WATT | V-A | VAR |
|-------------|------------|-----------|------|-----|-----|
| 80          | 0.23       | 0.14      | 45   | 380 | 357 |
| 70          | 0.35       | 0.21      | 30   | 470 | 410 |
| 60          | 0.41       | 0.29      | 26   | 550 | 450 |
| 50          | 0.58       | 0.36      | 24   | 619 | 470 |
| 40          | 0.7        | 0.49      | 18   | 682 | 512 |

ตารางที่ 9.2 แสดงปริมาณกระแสกระตุ้นและกำลังงานที่ความถี่ต่างๆ

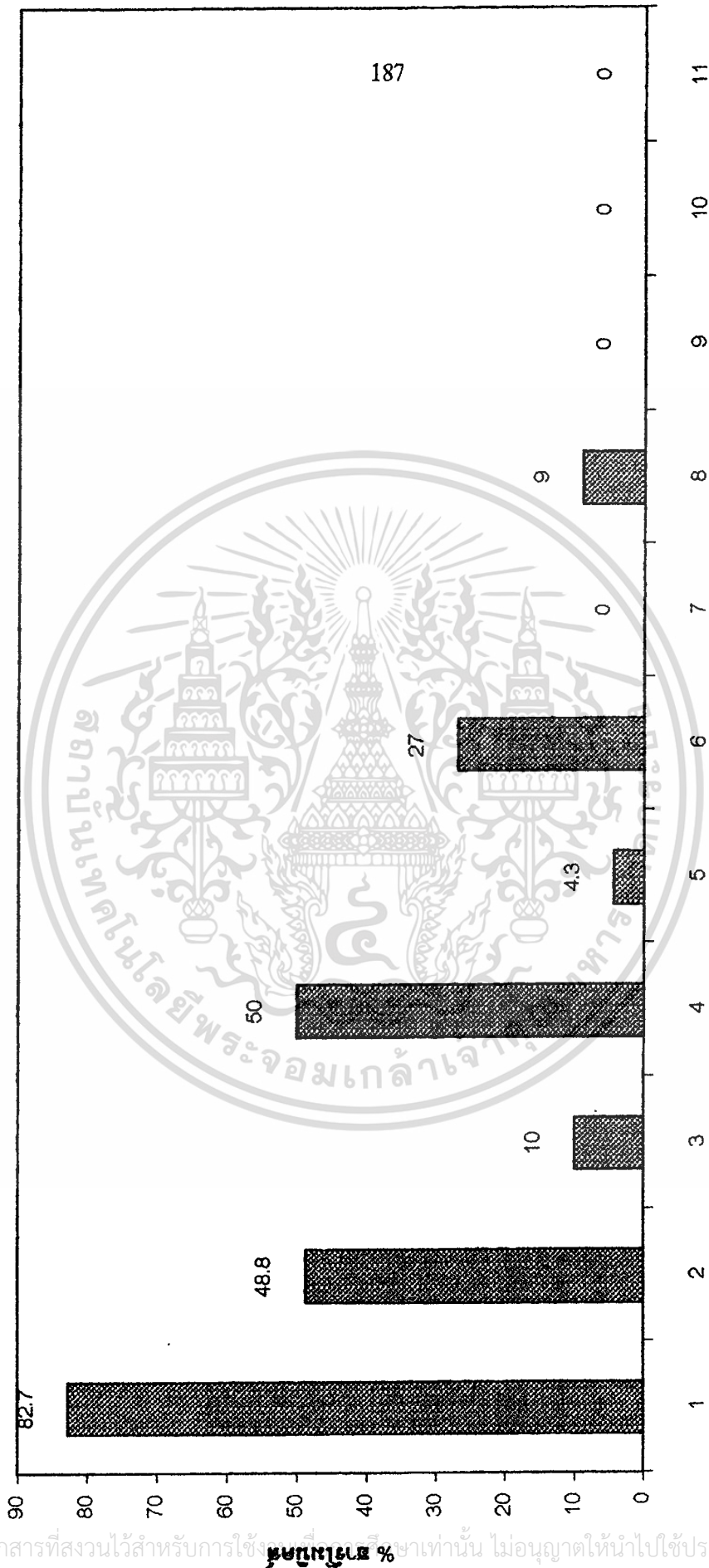
# % สารอินทรีย์ที่ 40 Hz



ลำดับสารอินทรีย์  
รูปที่ 9.2 เปอร์เซนต์สารอินทรีย์ที่ความถี่ 40 Hz

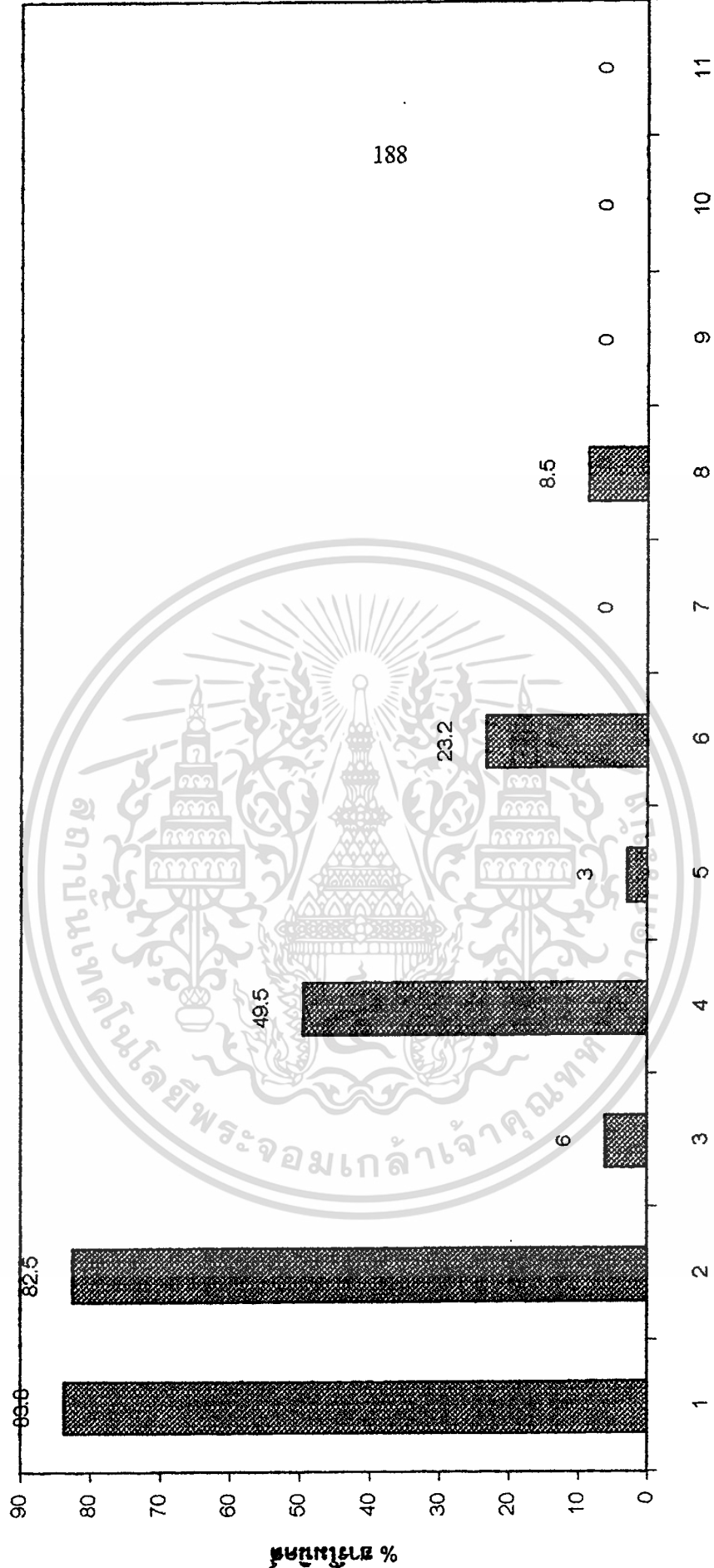
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# % สารโมโนคลที่ 50 Hz



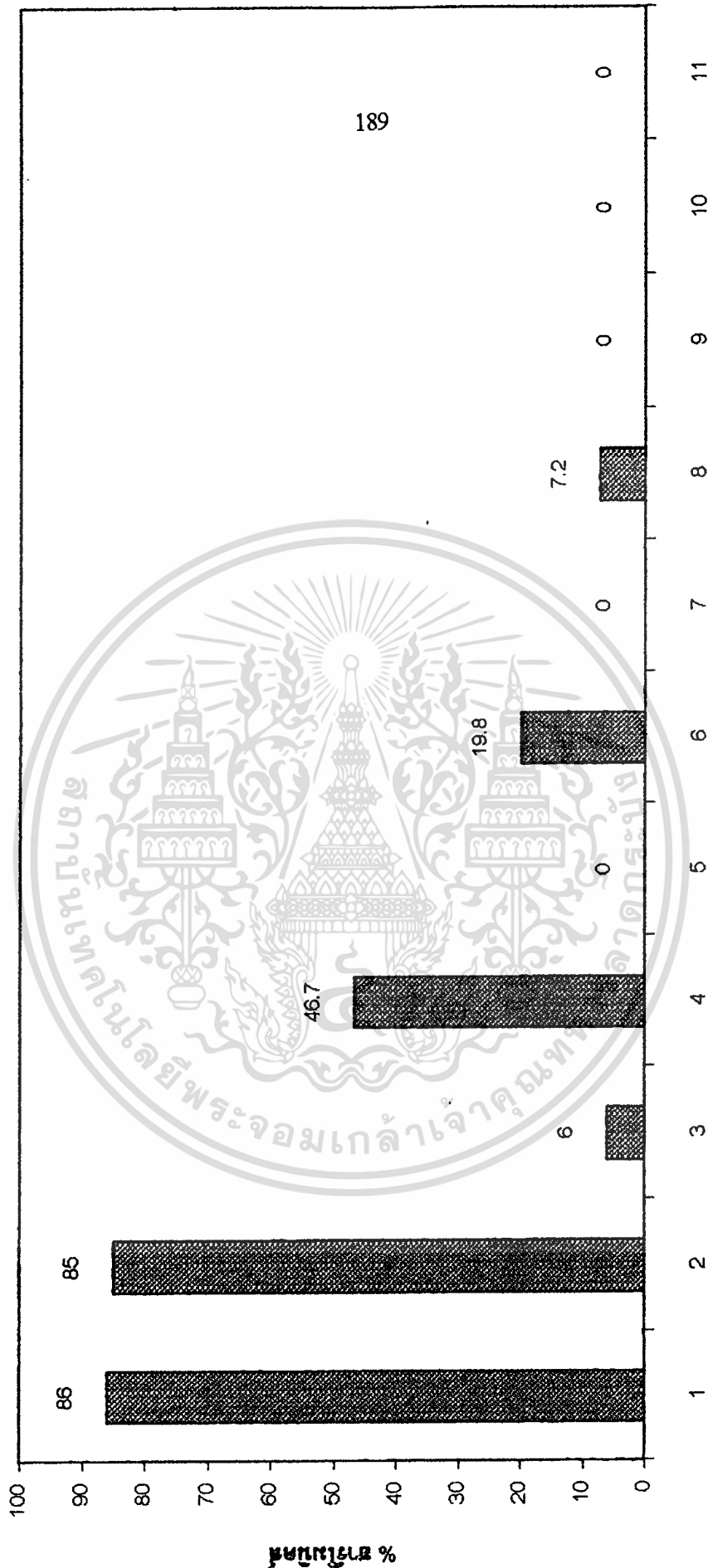
ลำดับสารโมโนคล  
รูปที่ 9.3 เปอร์เซนต์สารโมโนคลที่ลำดับต่างๆที่ความถี่ 50 Hz

# % ฮาร์โมนิกส์ที่ 60 Hz



ลำดับฮาร์โมนิก  
รูปที่ 9.4 เปอร์เซนต์ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆที่ความถี่ 60 Hz

# % ฮาร์โมนิกส์ที่ 70 Hz



ลำดับฮาร์โมนิกส์  
รูปที่ 9.5 เปอร์เซนต์ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆที่ความถี่ 70 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# % สารโมโนคัลที่ 80 Hz



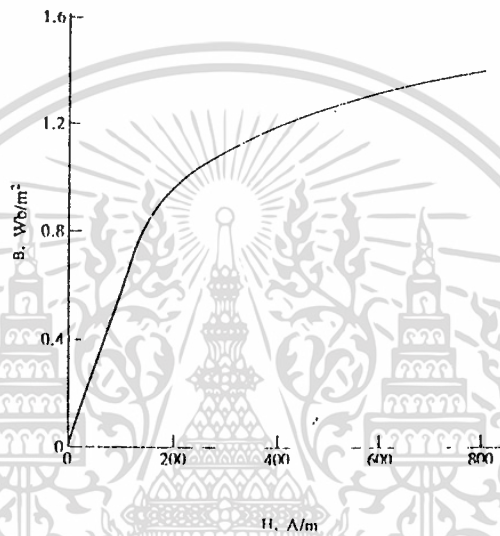
ลำดับสารโมโนคัล  
รูปที่ 9.6 เปอร์เซนต์สารโมโนคัลลำดับต่างๆที่ความถี่ 80 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองที่ได้เราจะพบว่าความถี่ต่าง ๆ กัน จะทำให้ ฮาร์โมนิกส์ ลำดับต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเนื่องจากสาเหตุดังนี้

### การใช้งานเครื่องจักร ภายใต้สถานะที่ไม่เป็นเชิงเส้น

ในการศึกษาทางทฤษฎีจากสมการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเราจะสมมุติว่า วงจรแม่เหล็กเป็นเชิงเส้น เนื่องจากความสะดวกในการคำนวณแต่ในความเป็นจริงเราจะพบว่าวงจรแม่เหล็ก จะไม่เป็นเชิงเส้น และจะมีการอิ่มตัวทางไฟฟ้า (Saturate) อธิบายได้จากกราฟ B-H Curve



รูป B-H curve

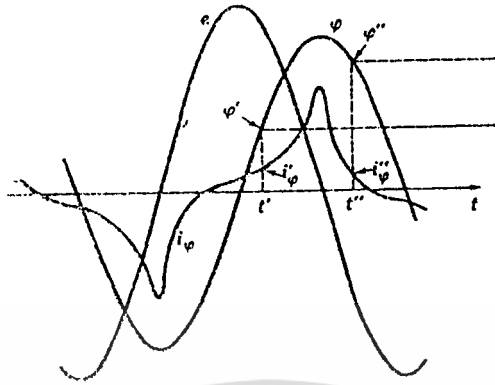
$B$  = ความหนาแน่นของฟลักซ์ ( $\text{Wb/m}^2$ )

$H$  = ขนาดความเข้มของสนามแม่เหล็ก ( $\text{A/m}$ )

เนื่องจากพื้นที่ของความขวแกน ( $\text{m}^2, \text{m}$ ) จะไม่เปลี่ยนแปลง จะทำให้ค่า  $B$  (flux density) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับฟลักซ์แม่เหล็ก ( $\text{Wb}$ ) และ  $H$  เป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสไฟฟ้า ( $\text{A}$ ) ดังนั้นความสัมพันธ์ของ ฟลักซ์แม่เหล็กและกระแส จะเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับ  $B - H$  curve

จากกราฟเราจะพบว่า ในการป้อนค่า  $H$  ( $\text{I}$ ) กระแสเข้าไปในช่วงแรกค่า  $B$  ( $\phi$ ) ที่ได้ออกมาจะเพิ่มขึ้นในอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกัน แต่ในสถานะที่แกนเหล็กอิ่มตัว (Saturated) การเพิ่มค่า  $H$  ( $\text{I}$ ) ขึ้นไป จะทำให้ค่า  $B$  ( $\phi$ ) ที่ได้ออกมาเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และช่วงที่เลขจุด อิ่มตัว จะต้องป้อนค่า  $H$  ( $\text{I}$ ) อย่างมากมายเพื่อที่จะทำให้ค่า  $B$  ( $\phi$ ) ที่ได้เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งในการออกแบบ เครื่องจักร ที่ใช้ในการทำงานจริง ที่พิกัดแรงดันและความถี่ จะถูกออกแบบเพื่อการใช้งานในย่าน อิ่มตัว ซึ่งจะทำให้ค่ากระแส กระตุ้น หรือ Magneto Motive Force ที่ได้ออกมาจะมีค่าดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### รูปกระแสกระตุ้น

ค่ากระแสกระตุ้นที่ได้ออกมาจะผิดเพี้ยนไปจาก คลื่นไซน์ เนื่องจากช่วงที่  $\phi$  มีค่าสูง จะต้องการ กระแสที่สูงมาก จึงทำให้รูปคลื่นกระแสช่วงแรกจะเป็น คลื่นไซน์ แต่ช่วงยอด จะมีปลายแหลมผิดเพี้ยน ไปจาก คลื่นไซน์ ทำให้เกิด ฮาร์โมนิกส์ ขึ้น  
และจากสมการ

$$V_{rms} = 4.44 f N \phi_{max}$$

$V$  = แรงดันไฟฟ้า (Volt)

$f$  = ความถี่ (Hz)

$N$  = จำนวนรอบ (Turn)

$\phi$  = ฟลักซ์แม่เหล็ก (Wb)

จากสมการจะพบว่า ถ้าป้อนความถี่ที่เพิ่มขึ้นจากฟักัด และให้แรงดันไฟฟ้าที่ฟักัด จะทำให้ ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะลดลง ซึ่งจะเปรียบเสมือนว่า เราใช้งาน เครื่องจักร ดังนั้นที่สถานะค่อนข้างจะเป็นเชิงเส้น ซึ่งจะทำให้ Magneto Motive Force (NI) จะค่อนข้างเป็น คลื่นไซน์ ทำให้ ฮาร์โมนิกส์ ที่เกิด ขึ้นลดลง และในทางกลับกัน ถ้าลดความถี่ลงโดยยังคงให้แรงดันไฟฟ้าที่ฟักัด จะทำให้ฟลักซ์แม่เหล็ก เพิ่มขึ้นเปรียบเสมือนว่าเราใช้งาน เครื่องจักร ที่เล็ขุด อึดตัว ทำให้ Magneto Motive Force หรือ กระแส กระตุ้นมีการผิดเพี้ยนของสัญญาณมากขึ้น (ปลายจะแหลมมากขึ้น) จะทำให้ ฮาร์โมนิกส์ เพิ่มขึ้น  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 10

## บทวิจารณ์และสรุป

ในการศึกษาและวิจัยในด้านการควบคุมและปรับความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ผ่านมา จะพบว่ามีการศึกษาเฉพาะในด้านเทคนิคการควบคุมมอเตอร์ ที่เป็นเทคนิคขั้นสูง ไม่ว่าจะเป็นเรื่องของวงจรสมมูล ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้น และอื่นๆที่ผู้อ่านจะต้องมีความรู้ทางด้านวิศวกรรมพอสมควร แต่ในส่วนของผู้ที่จะนำไปใช้งานจริงมักจะสนใจในเรื่องของ ประสิทธิภาพ การบริโภคกระแสและกำลังงาน แรงบิดที่ได้ ซึ่งผู้ที่ทำการวิจัยมักจะละเลยไป ประสิทธิภาพของมอเตอร์นี้ จึงได้ทำการทดลองในสองส่วนหลักๆ คือ ในส่วนของบทที่ 6 และ 8 จะเป็นข้อมูลของประสิทธิภาพ การบริโภคกำลังและแรงบิด ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จากการใช้แหล่งจ่ายที่เป็น Sinusoidal และอินเวอร์เตอร์ ส่วนในบทที่ 7 จะเป็นเรื่องเกี่ยวกับแรงบิดในการปรับ (V/F) ที่ความถี่ต่างๆคงที่จริงหรือไม่ และผลของฮาร์โมนิกส์ ซึ่งส่งผลต่อแรงบิด ว่าเป็นอย่างไร ส่วนในบทที่ 9 จะวิเคราะห์ถึง MMF WAVE FORM ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ความถี่ต่างๆเป็นอย่างไรบ้าง

## บทสรุปการวิจัยและศึกษาการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

### บทที่ 1- บทที่ 4

กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ในการนำมาประยุกต์กับการทดลองในบทต่อไป

### บทที่ 5

กล่าวถึงการทดลองและชุดทดลองรวมถึงพิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดลอง

### บทที่ 6

กล่าวถึงประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ความถี่ต่างกันโดยการปรับ (V/F) คงที่โดยการใช้อินเวอร์เตอร์ และ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะพบว่า ประสิทธิภาพของมอเตอร์จากการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีกว่า แต่ประสิทธิภาพโดยรวม (ระบบ) ของอินเวอร์เตอร์จะดีกว่า

### บทที่ 7

กล่าวถึงฮาร์โมนิกส์ที่ส่งผลต่อแรงบิด ทำให้ที่ความถี่สูงโดยการปรับ (V/F) ของอินเวอร์เตอร์จะให้แรงบิดที่มากกว่า

### บทที่ 8

กล่าวถึงลักษณะการบริโภคพลังงาน แรงบิดที่แกน Power Factor และประสิทธิภาพจากการใช้อินเวอร์เตอร์ และ โดยการจ่ายตรงในการขับเคลื่อนที่ %Slip ต่างๆ ซึ่งส่วนที่น่าสนใจจะพบว่า ในการใช้งานปกติแรงบิด จากการจ่ายตรงที่ %Slip เดียวกันจะสูงกว่า แต่แรงบิดสูงสุดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะได้จากการจ่าย โดยอินเวอร์เตอร์

### บทที่ 9

จะกล่าวถึง MMF WAVE FORM ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ความถี่ต่างๆ ซึ่งจะพบว่า ที่ความถี่สูงจะลดฮาร์โมนิกส์ ลำดับต่างๆลงได้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จขึ้นได้โดยเกิดจาก บุคคลที่ควรกล่าวถึงหลายท่านที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษาเป็นอย่างดียิ่ง ท่าน อาจารย์พิจิต ล้ายอง ที่เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้มากกว่าคำปรึกษานั้นคือความปรารถนาดี ที่มีต่อพวกเราท่านอาจารย์ดร. วิจิตร กิณเรศ ที่ได้กรุณาตอบข้อสงสัยต่างๆ คุณ ฉันทกร จำสิลปี น.ศ. ปริญญาโทที่ให้กำลังใจและจัดซื้ออุปกรณ์ที่เกิดจากคอมพิวเตอร์ รวมทั้ง พี่ๆที่ห้องทดลองประจักษ์ภาควิชาไฟฟ้า รวมทั้งพี่ๆเพื่อนๆน้องๆที่ให้ความช่วยเหลือตลอดมา สุดท้ายที่ต้องขอขอบคุณเป็นพิเศษนั้นคือ คุณพ่อ คุณแม่ ของพวกเราทุกคนที่ได้ให้ชีวิตที่ดีกับพวกเรา





## เอกสารอ้างอิง

- [1] A.E. Fitzgerald Chales Kingsley Jr. , Stephen D. Uman “Electric Machinery” Fifth Edition, McGraw-Hill,1992
- [2] Valado Ostovic , “ Computer Analysis ElectricMachinery Mathematica Approach” McGraw-Hill, 1992
- [3] ฟิรศักดิ์ วรสุนทรโรสถ, ณรงค์เดช ศรีธวัชอมร , “ทฤษฎีวิเคราะห์วงจรเครื่องจักรไฟฟ้า” คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , พิมพ์ครั้งที่ 2 , 2538
- [4] Paul C. Krause , “Analysis of Electric Machinery”, McGraw-Hill,1986
- [5] โกวิท มาศรัตน์ , “เครื่องจักรกลไฟฟ้า” ,มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ,พิมพ์ครั้งที่ 2, 2538
- [6] พิชิต ถ้ายอง , “เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 , คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2537
- [7] G.O. Garcia, J.C. Mendes Luis, R.M. Stephan, and E.H. Watanabe , “An Efficient Controller for an Adjustable Speed Induction Motor Drive” IEEE J. Industrial Electronics, Vol. 41 , No.5,pp 533-539, October 1994
- [8] ชีรเดช ทองขวัญ, ชีรยุทธ เพชรอุไร, ชีรศักดิ์ เพชรโชติ, สุรินทร์ คำฝอย , “การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์โดยใช้อินเวอร์เตอร์ไมโครคอนโทรลเลอร์” ,ปริยญานิพนธ์ปีการศึกษา 2539 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง