

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การพัฒนารถไฟฟ้า AC

DEVELOPMENT OF ELECTRIC VEHICLE AC



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2541

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 34153
วัน, เดือน, ปี..... 6 ต.ค. 2542

ขอสงวนลิขสิทธิ์ในการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ที่ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2541
การพัฒนารถไฟฟ้า AC
DEVELOPMENT OF ELECTRIC VEHICLE AC.

โดย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2541

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การพัฒนารถไฟฟ้า AC (DEVELOPMENT OF ELECTRIC VEHICLE AC.)

ผู้จัดทำ

1. นาย เกียรติศักดิ์ แก้วมณี
2. นาย ณัฐพล รัชศรี
3. นาย วีรพงษ์ พันธ์
4. นาย บำรุง ธนพรภิบาลชน
5. นาย สุขชัย จิรนรวินิชย์
6. นาย สุริยาคม แดงใหญ่
7. นาย ทฤษฎี จรดล



..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ. ประภาส ไพรสุวรรณ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนารถไฟฟ้า AC

นาย เกียรติศักดิ์ แก้วมณี

นาย ธีรพล รัชศรี

นาย ชีรพงษ์ พันธ์

นาย บำรุง ธนพรภิบาลชน

นาย สุขชัย ชีรนรวิชย์

นาย สุริยาคม แดงใหญ่

นาย ทฤษฎี จรดล

ผศ. ประภาส ไพรสวรรณา อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2541

บทคัดย่อ

ในโลกปัญหาหมอกภาวะทางอากาศ ยังคงเป็นสิ่งที่ทั่วโลกให้ความสนใจ เนื่องจากยังไม่สามารถที่จะหาหนทางแก้ไขหมอกภาวะทางอากาศให้หมดสิ้นไปได้ ดังนั้นแนวความคิดในการนำรถยนต์ไฟฟ้ามาใช้งานก็เป็นส่วนหนึ่งที่นักประดิษฐ์ทั่วโลกพยายามค้นคว้า เพื่อเป็นส่วนช่วยในการลดปัญหาเหล่านี้

รถยนต์ไฟฟ้าในโครงการนี้ต่างจากรถยนต์ปกติทั่วไป คือการใช้มอเตอร์อินดักชันเป็นตัวขับเคลื่อนแทนที่จะใช้น้ำมัน โดยพลังงานไฟฟ้านี้จะเปลี่ยนเป็นพลังงานกล ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดสารพิษต่างๆ จะทำให้สภาวะแวดล้อมทางอากาศดีขึ้น จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจควรจะศึกษาเป็นอย่างยิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF ELECTRIC VEHICLE AC

Keattisak Kaewmanee
Nuttapon Ruksasri
Theerapong Phatchanee
Bamrung Tanapornpibalchon
Sukchai Cheeranorawanit
Suriyakhom Dangyai
Harisadee Jolradol
Asst. Prof. Prapas Prisuwana Advisor
Year 1998

Abstract

In our world today. Pollution is a big problem we face. Air pollution is the one problem which can not solve right now. Most of the inverter try to research and develop in reducing these one. The different between electrical vehicle of this project and regular vehicle is using induction motor instead of gasoline for motive force. This electric energy shall be change to mechanical energy which produce none of all topic. These would create more better pollution.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	2
2.1 มอเตอร์อินคักชัน	2
2.2 การขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ	18
2.3 ระบบเครื่องปรับอากาศในรถยนต์	39
2.4 แบตเตอรี่	45
บทที่ 3 การคำนวณและการสร้าง	53
3.1 ลักษณะโครงสร้างของรถไฟฟ้า	53
3.2 การเลือกขนาด Induction Motor	60
3.3 วงจรการต่อและการทำงานของ Inverter	61
3.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นำมาประยุกต์ใช้เพื่อ Charge แบตเตอรี่	63
3.5 วงจรไฟฟ้ายานยนต์	65
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	66
4.1 ทดสอบความสามารถในการควบคุมความเร็ว Induction Motor โดย Inverter	66
4.2 การทดสอบการทำงานของระบบขับเคลื่อน	67
4.3 การทดสอบการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าในขณะ No-Load	68
4.4 การทดสอบการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าในขณะเพิ่ม Load	69
บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป	71
5.1 ปัญหาและการแก้ไขปรับปรุง	71
5.2 สรุป	72
ภาคผนวก ก	74
ภาคผนวก ข	75
ภาคผนวก ค	76
ภาคผนวก ง	79
ภาคผนวก จ	80

กิตติกรรมประกาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
เอกสารอ้างอิง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูป 1 มอเตอร์อินดักชัน	2
รูป 2 สเตเตอร์ของมอเตอร์อินดักชัน	3
รูป 3 โรเตอร์แบบกรงกระรอก	4
รูป 4 โรเตอร์แบบพันขดลวด	4
รูป 5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด – ความเร็วรอบ ของมอเตอร์อินดักชัน	7
รูป 6 ช่วงที่ Induction Machine มีคุณสมบัติเป็นมอเตอร์, เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและช่วงเบรก	7
รูป 7 คุณลักษณะของมอเตอร์อินดักชัน	7
รูป 8 การทดสอบขณะไม่มีโหลด	8
รูป 9 วงจรเทียบเคียงของมอเตอร์อินดักชัน ในการทดสอบขณะไม่มีโหลด	9
รูป 10 การต่อ Induction Motor และอุปกรณ์เพื่อการทดสอบโดยยึดโรเตอร์ให้หนึ่ง	10
รูป 11 วงจรเทียบเคียงการทดสอบยึดโรเตอร์	10
รูป 12 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดขณะ โหลดต่างๆ	13
รูป 13 จุดสมมูลย์	14
รูป 14 จุดสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	15
รูป 15 ชนิดของภาระโหลด	17
รูป 16 แสดงวงจรสมมูลย์ในรูปต่อเฟส	19
รูป 17 ตัวอย่างคุณลักษณะของแรงบิดและความเร็ว เมื่อ V_s และ f คงที่ตามพิกัด	22
รูป 18 แสดงคุณลักษณะของ I_r กับ f_{sl} โดยที่ V_s และ f คงที่ตามพิกัด	23
รูป 19 การเริ่มเดินของมอเตอร์ (Motor-Start-Up) โดยให้ V_s และ f คงที่ตามพิกัด	23
รูป 20 แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน, ทอร์ค, กระแสสเตเตอร์กับความถี่	24
รูป 21 แสดง Speed-Torque Curve ของมอเตอร์ เมื่อใช้วิธีควบคุมแรงดันและความถี่ที่สเตเตอร์	25
รูป 22 ความถี่ขณะเริ่มเดิน	27
รูป 23 การเพิ่มขึ้นของความถี่ f ขณะเริ่มเดิน	27
รูป 24 เฟสเซอร์ไออะแกรมที่ค่า f_{sl} มีค่าน้อยๆ	28
รูป 25 การเพิ่มระดับแรงดันเป็นที่ต้องการ เพื่อรักษาฟลักซ์ในช่องอากาศให้คงที่	29
รูป 26 คุณลักษณะและสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	30

รูป 27a การอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส	32
รูป 27b การต่อขดลวดทุกขั้วขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้าเข้าอินเวอร์เตอร์	32
รูป 28 แสดงโหมมการทำงานของอินเวอร์เตอร์	33
รูป 29 แสดงสัญญาณเอาต์พุตที่ได้	34
รูป 30 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบอินเวอร์เตอร์เพื่อการขับนำมอเตอร์เหนี่ยวนำ	35
รูป 31 PWM – VSI : a) โครงสร้าง b) รูปคลื่นสัญญาณ	36
รูป 32 การเบรคด้วยวิธีทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ใน PWM – VSI	38
รูป 33 อีวาพอเรเตอร์	39
รูป 34 คอมเพรสเซอร์แบบสวอชเฟลต	40
รูป 35 คอนเดนเซอร์	41
รูป 36 แสดงตำแหน่งที่ติดตั้งรีซีฟเวอร์ครายเออร์ในระบบ	43
รูป 37 รีซีฟเวอร์ครายเออร์	44
รูป 38 ความสัมพันธ์ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความต้านทานของสารละลายกรดซัลฟูริก	48
รูป 39 เปรียบเทียบความจุของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว – กรด ที่อุณหภูมิปกติและที่ต่ำกว่าปกติ	49
รูป 40 กราฟแสดงการอัดไฟในแต่ละระบบ	50
รูป 41 โครงสร้างทาง Machanic ของ Chassis ของรถไฟฟ้า AC	53
รูป 42 ระบบกันสะเทือนของรถไฟฟ้า AC	54
รูป 43 ระบบบังคับถ่วง	55
รูป 44 ระบบเบรคแบบดัมพ์เบรค(Dump Break)	56
รูป 45 ระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้า AC	57
รูป 46a) รายละเอียดของโครงสร้างช่วงล่าง(Chassis) มองจากด้านบน	58
รูป 46b) รายละเอียดของโครงสร้างช่วงล่าง(Chassis) มองจากด้านข้าง	59
รูป 47 Terminal Connection Diagram of Main Circuit	61
รูป 48 Terminal Connection Diagram of Control Circuit	62
รูป 49 วงจรการต่อชุดปรับความถี่ของ Inverter	62
รูป 50 วงจรการ Charge แบตเตอรี่โดยใช้ Generator ภายในรถไฟฟ้า AC	64
รูป 51 แสดงวงจรไฟฟ้าในรถไฟฟ้า AC	65

	หน้า
รูป 52 วงจรการทดลองใช้ Inverter ควบคุมความเร็ว Induction Motor	66
รูป 53 แสดงการติดตั้งระบบขับเคลื่อน โครงสร้างของรถกับ Motor	67
รูป 54 การทดสอบการขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าด้วยเครื่อง Chassis Dynamometer	68
รูป 55 แสดง Dimension ของ Inverter	74
รูป 56 จอแสดงผล (Operation Panel)	75
รูป 57 แสดงการโปรแกรม Inverter ที่ Monitor	79



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 สมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบของโหลด	13
ตาราง 2 ชนิดของฟักัดการใช้งาน	16
ตาราง 3 เปรียบเทียบขนาดความจุของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ที่อุณหภูมิปกติและที่ต่ำกว่าปกติ	49
ตาราง 4 Detail of Main Circuit Terminal	61
ตาราง 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของมอเตอร์ กระแส และความถี่ของอินเวอร์เตอร์	67
ตาราง 6 ผลการทดลองขณะ No-Load	69
ตาราง 7 ผลการทดลองขณะเพิ่ม Load	70
ตาราง 8 รหัสคำสั่งการทำงาน	76
ตาราง 9 แสดงฟังก์ชันการป้องกันของอินเวอร์เตอร์	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันนี้ ผลของเทคโนโลยีที่มีการพัฒนาขึ้นเรื่อยๆ ทำให้เห็นนวัตกรรมต่างๆ ถูกพัฒนาอย่างไม่หยุดยั้งก็เพื่อตอบสนองความต้องการของมนุษย์ จนเป็นผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสิ่งต่างๆ มากมาย เมื่อมีการพัฒนาเพื่อตอบสนองมากเท่าใดก็ก่อให้เกิดผลเสียกับสิ่งต่างๆ ได้มากเท่านั้น สภาวะแวดล้อมก็เป็นผลกระทบที่เห็นได้ชัดเจนอีกอันหนึ่งที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็ว

สภาวะแวดล้อมต่างๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงนี้เราจะเห็นได้ชัดเจนที่สุดก็คือ อากาศ ซึ่งมีความจำเป็นต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์เป็นอย่างมาก จากการพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ ได้ทำให้เกิดมลพิษทางอากาศขึ้น โดยเฉพาะในเมืองส่วนใหญ่เกิดจากการใช้รถยนต์ยานพาหนะต่างๆ ซึ่งจะมีรถยนต์วิ่งอยู่ทั่วไปตามท้องถนนสายต่างๆ เป็นจำนวนมากและได้ปล่อยเขม่าควันพิษที่เป็นสารคาร์บอนมอนนอกไซด์และสารพิษอื่นๆ ออกมา ซึ่งสารเหล่านี้เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (Green House Effect) และเป็นผลให้ชั้นบรรยากาศของโลกถูกทำลายลง

โดยเชื้อเพลิงที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถยนต์ยานพาหนะในปัจจุบันคือ น้ำมัน แม้ว่าในปัจจุบันนี้จะมีการพัฒนาน้ำมันที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงออกมาเพื่อลดสารพิษ ที่จะปล่อยออกมาจากรถยนต์ก็ตามที แต่เนื่องจากการใช้รถยนต์ของมนุษย์นั้นมีอัตราเพิ่มขึ้น ทำให้เราต้องหาวิธีการใหม่ๆ เพื่อไม่ให้เกิดมลพิษจากการใช้รถยนต์ยานพาหนะ ดังนั้นเราจึงพยายามคิดค้นวิธีการที่เปลี่ยนจากการใช้น้ำมันที่เป็นเชื้อเพลิงในการขับเคลื่อนรถยนต์ยานพาหนะ

รถยนต์ไฟฟ้าเป็นสิ่งที่จะมาทดแทนรถยนต์ที่เห็นวิ่งกันอยู่ในท้องถนนปัจจุบัน สิ่งที่จะศึกษาก็คือ จะทำอย่างไรที่จะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกลเพื่อใช้ในการขับเคลื่อน และควบคุมความเร็วอย่างไรให้เหมาะสม โดยทั่วไปก็รู้กันว่ามอเตอร์มีคุณสมบัติดังกล่าว การที่จะควบคุมความเร็วของมอเตอร์นั้นก็ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของมอเตอร์ที่จะนำมาใช้ (ในโครงการนี้ใช้มอเตอร์อินดักชันเนื่องจากราคาถูก ดูแลง่ายและความเร็วเปลี่ยนแปลงน้อยมาก จากสภาพไม่มีโหลด กับโหลดเต็มพิกัด ในการควบคุมความเร็วก็ใช้ อินเวอร์เตอร์เป็นตัวควบคุมซึ่งในปัจจุบันมีมากมายหลายแบบและใช้งานง่าย) ในทางด้านโครงรถนั้นใช้ไฟเบอร์กลาส เพราะมีความแข็งแรงและน้ำหนักเบาเหมาะกับรถยนต์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

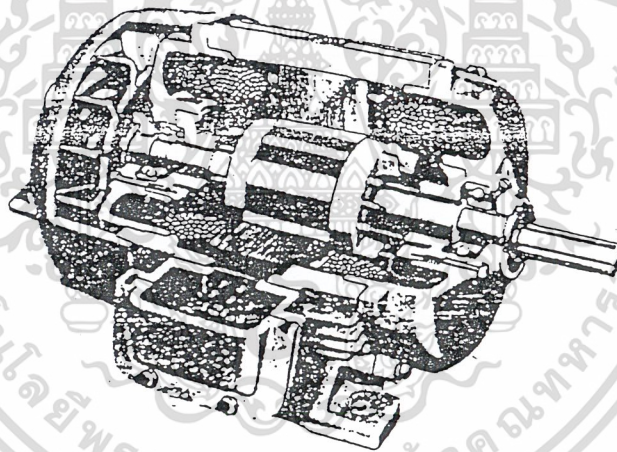
บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 มอเตอร์อินดักชัน (Induction Motor)

ปกติเครื่องกลอินดักชันเป็นได้ทั้งมอเตอร์และเครื่องกำเนิด แต่ถ้านำมาใช้เป็นเครื่องกำเนิด จะมีข้อเสียมากจึงไม่ค่อยนิยมใช้กัน ดังนั้นเมื่อกล่าวถึงเครื่องกลอินดักชัน จึงมักหมายถึง มอเตอร์อินดักชัน

คำว่า “อินดักชัน (induction)” หมายถึง การเหนี่ยวนำ บางครั้งเราเรียกมอเตอร์อินดักชันว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำ สาเหตุที่เรียกเช่นนี้เพราะการหมุนของมอเตอร์ดังกล่าว เกิดจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กหมุนของขดลวดที่สเตเตอร์ที่มีต่อตัวนำโรเตอร์



รูป 1 มอเตอร์อินดักชัน

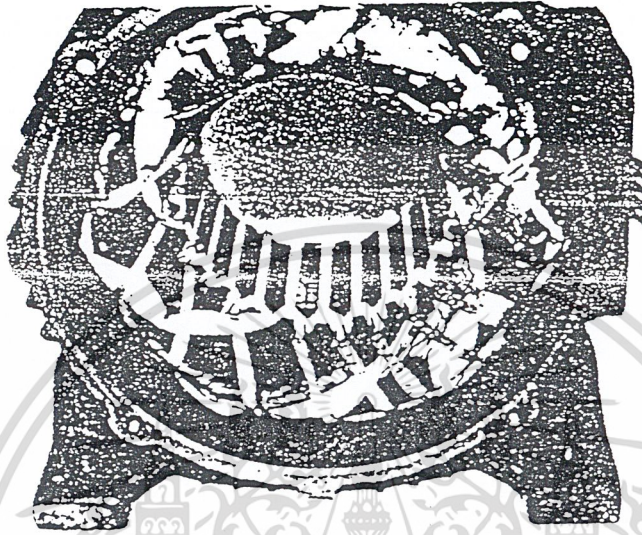
มอเตอร์ในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนมากเป็นมอเตอร์อินดักชัน 3 เฟส เพราะมอเตอร์นี้มีราคาไม่แพงมากนัก ต้องการการดูแลรักษาน้อยและมีความเร็วเกือบคงที่ คือความเร็วลดลงจากสภาพไม่มีโหลดจนกระทั่งขับโหลดเต็มที่เพียงไม่กี่เปอร์เซ็นต์ แต่มีข้อเสียคือ

1. ควบคุมความเร็วยาก
2. ขณะมีโหลดน้อยจะทำงานที่ power factor ต่ำและถ้าหลัง
3. กระแสไฟฟ้าเริ่มต้นหมุน มักจะเป็น 5 ถึง 7 เท่าของกระแสไฟฟ้า ขณะขับโหลดเต็มที่

2.1.1 โครงสร้างของมอเตอร์อินดักชัน 3 เฟส (Induction Motor Construction)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 มอเตอร์อินดักชันมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ส่วนอยู่กับที่ (stator) และส่วนที่หมุน (rotor)
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุตบแต่งสิ่งเหล่านี้และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

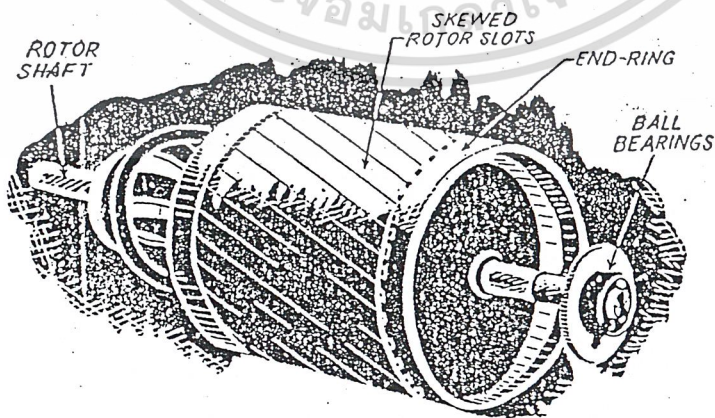
-สเตเตอร์ มีหน้าที่ยึดขดลวดอาร์เมเจอร์ที่บรรจุอยู่ในสล็อตทำด้วยแผ่นลามิเนตบางๆอัดเป็นรูปทรงดังรูป 2



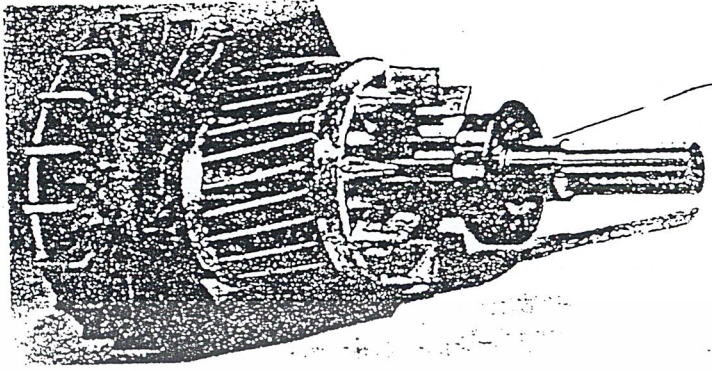
รูป 2 สเตเตอร์ของมอเตอร์อินดักชัน

-โรเตอร์ แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

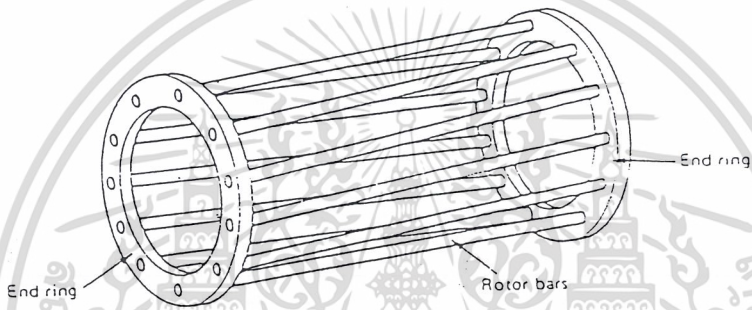
1. แบบกรงกระรอก (squirrel cage) มีแท่งตัวนำ (rotor bar) คล้ายกรงกระรอกฝังอยู่ในโรเตอร์ที่ปลายทั้งสองด้านของตัวนำถูกัดวงจรด้วยตัวนำรูปวงแหวน (End ring) ดังรูป 3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

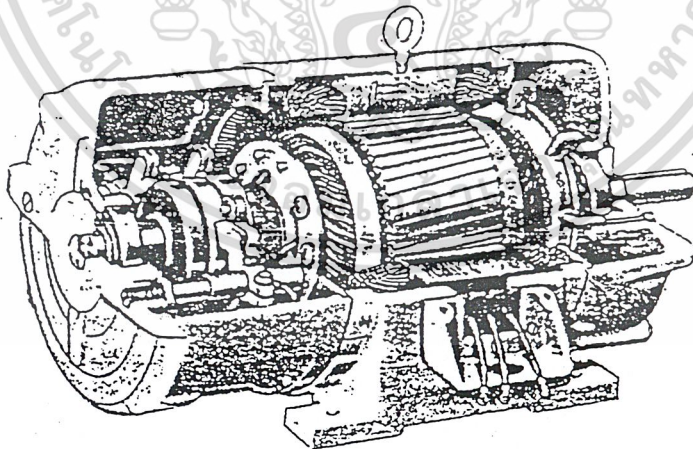


(a)



(b)

รูป 3 โรเตอร์แบบกรงกระรอก



รูป 4 โรเตอร์แบบพันขดลวด

แท่งตัวนำของโรเตอร์มักมีลักษณะเฉียงเพราะจะทำให้โรเตอร์หมุนได้ราบเรียบและลด

ปัญหาเสียงฮัมของแม่เหล็ก (magnetic hum)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แบบขดลวดพันรอบโรเตอร์ (wound rotor) โรเตอร์แบบนี้แตกต่างกับแบบกรงกระรอก คือ มีขดลวดทองแดงพันรอบตัวโรเตอร์ ส่วนปลายของขดลวดนี้จะต่ออยู่กับสลิปริงซึ่งมีแปรงถ่านติดตั้งอยู่ดังรูป 4 และมีข้อจำกัดคือ โรเตอร์ต้องมีจำนวนขั้วเท่ากับจำนวนขั้วที่เกิดจากสเตเตอร์

2.1.2 หลักการทำงาน (Principle of Operation)

ถ้าจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ให้ขดลวดอาร์เมเจอร์ที่สเตเตอร์ จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนเมื่อฟลักแม่เหล็กของสนามแม่เหล็กหมุนเคลื่อนตัวตัดตัวนำที่ฝังอยู่ในโรเตอร์จะเกิดการเหนี่ยวนำ และเนื่องจากโรเตอร์ถูกตัดวงจรจึงเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำและแรงบิด เป็นผลให้โรเตอร์ หมุนไปในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุน กล่าวคือ

สนามแม่เหล็กหมุนดังกล่าวจะหมุนด้วยความเร็วเชิงโคโรนัส (N_s) ซึ่งหาค่าได้จาก

$$N_s = \frac{120 f_e}{P} \dots\dots\dots(2.1)$$

เมื่อ

f_e = ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์

P = จำนวนขั้วของมอเตอร์

แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ตัวนำของโรเตอร์ (e_{ind}) หาค่าได้ดังนี้

$$e_{ind} = (V * B_s) * l \dots\dots\dots(2.2)$$

เมื่อ V = ความเร็วของโรเตอร์

B_s = ความหนาแน่นของฟลักแม่เหล็กของขดลวดที่สเตเตอร์

l = ความยาวของโรเตอร์

แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะสร้างกระแสไฟฟ้า ทำให้เกิดความหนาแน่นของฟลักแม่เหล็กในตัวนำของโรเตอร์ (B_r) และเกิดปฏิสัมพันธ์กับความหนาแน่นของฟลักแม่เหล็กของสเตเตอร์จึงเกิดแรงบิดที่โรเตอร์ (T_{dr}) ซึ่งหาค่าได้ดังนี้

$$T_{dr} = KB_r * B \dots\dots\dots(2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงบิด T_{dr} จะทำให้โรเตอร์หมุนไปได้ด้วยความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส ถ้าความเร็วของโรเตอร์เท่ากับความเร็วซิงโครนัส ค่า e_{ind} และ T_{dr} จะเท่ากับศูนย์ โรเตอร์จึงหยุดหมุน ดังนั้นการเร่งความเร็วของมอเตอร์อินดักชันจึงไม่สามารถทำให้ความเร็วของโรเตอร์เท่ากับความเร็วซิงโครนัสได้

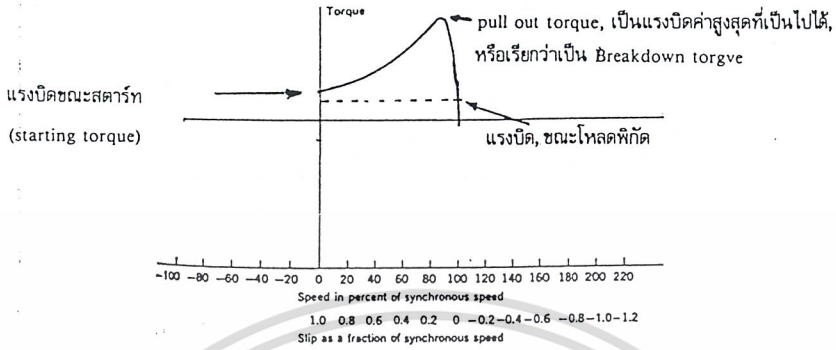
การกลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์อินดักชันทำได้ง่าย เพียงแค่สลับสายไฟคู่ใดคู่หนึ่งที่ย้ายให้ขดลวดที่สเตเตอร์ เท่านั้น ก็จะทำให้สนามแม่เหล็กหมุนและโรเตอร์หมุนกลับทิศทางได้ นับว่าเป็นข้อดีอีกข้อหนึ่งของมอเตอร์ชนิดนี้

2.1.3 คุณลักษณะ (Induction Motor Characteristic)

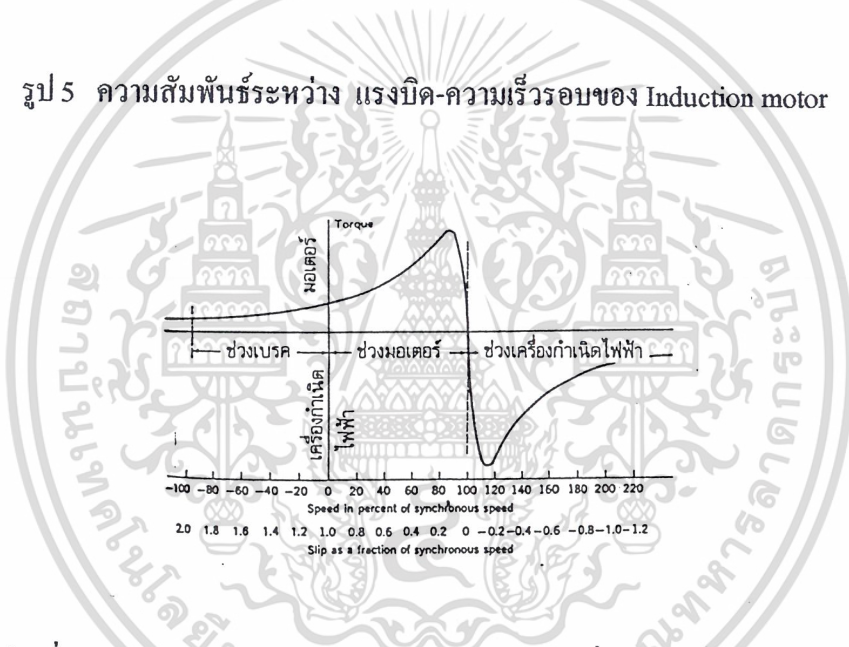
มอเตอร์อินดักชันแบบ wound rotor ที่ปรับความเร็วได้ จะใช้ความต้านทานที่ปรับค่าจากภายนอกได้ค่านุกรมเข้ากับขดลวดโรเตอร์หรือเพิ่มแรงบิดเริ่มต้นหมุนมอเตอร์แบบนี้ไปใช้กับโหลดที่ต้องเริ่มหมุนบ่อยๆ เช่น ปั่นจั่น เป็นต้น

ส่วนงานที่ต้องการกำลังงานกลค่อนข้างคงที่และเริ่มต้นหมุนไม่บ่อยนัก เช่น มอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อน เครื่องเป่าอากาศ, พัดลม เป็นต้น จะใช้ มอเตอร์อินดักชันที่มีโรเตอร์แบบกรงกระรอก จาก รูป เป็น curve แสดงคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วในมอเตอร์อินดักชัน 3 เฟส ทำให้ทราบข้อมูลในการทำงานของมอเตอร์อินดักชันดังนี้

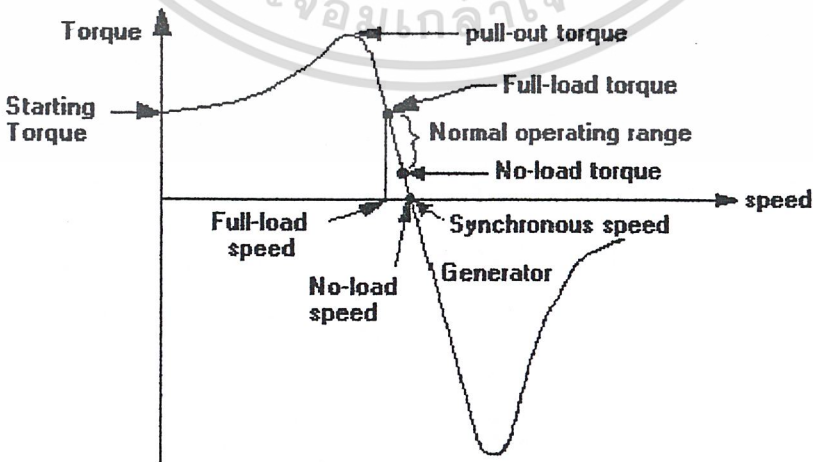
1. แรงบิดที่เกิดขึ้น (developed torque) เป็นศูนย์ที่ความเร็วซิงโครนัส
2. curve แรงบิด-ความเร็วเป็นเชิงเส้นในช่วงระหว่างแรงบิดขณะไม่มีโหลด (no load torque) เราเรียกช่วงนี้ว่า ย่านทำงานปกติ (normal operating range) ของมอเตอร์
3. มีแรงบิดสูงสุด (maximum torque: T_{max} ซึ่งบางครั้งเรียกว่า pull-out torque) เป็น 2-3 เท่าของแรงบิดที่พิกัดขณะจ่าย โหลดเต็มที่
4. มีแรงบิดเริ่มต้นหมุน (starting torque) มากกว่าแรงบิดที่พิกัดเล็กน้อย ดังนั้นมอเตอร์จึงเริ่มหมุนได้ทันที โดยแรงบิดที่โหลดนั้นจะต้องไม่มากกว่าแรงบิดที่พิกัด
5. การสลับสายคู่ใดคู่หนึ่งจะทำให้สนามแม่เหล็กเปลี่ยนทิศทาง มอเตอร์จึงหมุนกลับทิศทางได้ แต่ก่อนที่จะกลับทิศทางนั้นจะมีอยู่จุดหนึ่งที่มอเตอร์หยุดอยู่กับที่อย่างรวดเร็ว ซึ่งเราเรียกว่า plugging ซึ่งนำไปสู่หลักการควบคุมมอเตอร์แบบหนึ่ง
6. ถ้าโรเตอร์ของมอเตอร์อินดักชันถูกขับเคลื่อนด้วยความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส แรงบิดที่เกิดขึ้นในโรเตอร์จะกลับทิศทาง มอเตอร์ดังกล่าวจะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งเปลี่ยนกำลังกลเป็นกำลังไฟฟ้า



รูป 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงบิด-ความเร็วรอบของ Induction motor



รูป 6 ช่วงที่ Induction machine มีคุณสมบัติเป็นมอเตอร์, เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและช่วงเบรค



รูป 7 คุณลักษณะของมอเตอร์อินดักชั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 การหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรเทียบเคียง

(Determination of Equivalent Circuit Parameter)

การคำนวณคุณลักษณะของมอเตอร์อินดักชันจะต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์ มอเตอร์อินดักชันลงในวงจรเทียบเคียง ค่าพารามิเตอร์จะหาได้จากการทดสอบขณะไม่มีโหลดและทดสอบยึดโรเตอร์ ซึ่งเปรียบได้กับการทดสอบเปิดวงจรและการทดสอบลัดวงจรในหม้อแปลงไฟฟ้า

- การทดสอบขณะไม่มีโหลด (No-Load Test)

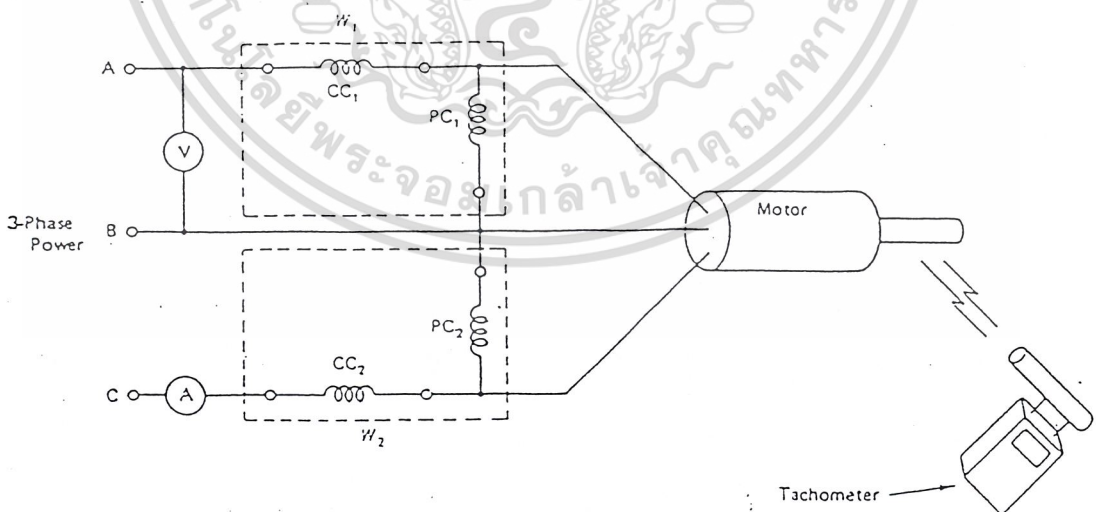
การทดสอบนี้ต้องจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ปกติให้กับขดลวดที่สเตเตอร์ขณะไม่มีโหลดต่อที่แกนของมอเตอร์ ดังรูป 8 ค่าที่ต้องการทราบ คือ

V_{nl} = แรงดันไฟฟ้าที่สายของสเตเตอร์ (อ่านได้จากโวลท์มิเตอร์ : V)

I_{nl} = กระแสไฟฟ้าที่สาย (อ่านได้จากค่าแอมมิเตอร์ : A)

P_{nl} = กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ขณะไม่มีโหลดทั้ง 3 เฟส (อ่านได้จากผลรวมของวัตต์มิเตอร์ทั้ง 2 ตัว หรือ $P_{nl} = W_1 + W_2$)

การทดสอบนี้ไม่มีโหลดต่ออยู่ที่แกน ดังนั้นความเร็วของโรเตอร์ (N_r) จึง (วัดได้จาก Tachometer) ส่งผลให้ค่าสลิปต่ำ (จากสมการ $S = (N_s - N_r) / N_s$) นอกจากนี้กระแสไฟฟ้าของโรเตอร์ (P_{cur}) มีค่าต่ำมาก (จากสมการ $P_{cur} = (I_r)^2 R_r$) เราจึงไม่คิดค่ากำลังสูญเสียในส่วนนี้



รูป 8 การทดสอบขณะไม่มีโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูอาจารย์เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น P_{nl} จึงประกอบด้วยกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (P_{core}) , กำลังสูญเสียทางกล (P_{mech}) และกำลังสูญเสียในขดลวดทองแดงของสเตเตอร์ทั้ง 3 เฟส เขียนเป็นสมการได้ดังนี้ คือ

$$P_{cur} = 3 (I_{nl})^2 R_s \dots\dots\dots(2.4)$$

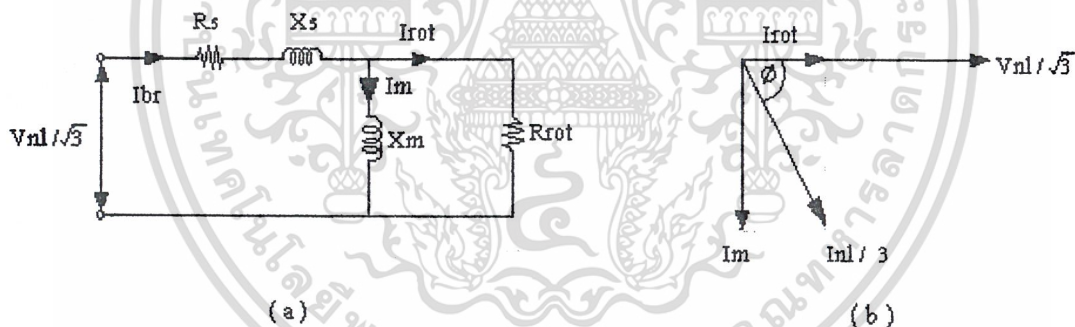
$$P_{nl} = P_{core} + P_{mech} + 3 (I_{nl})^2 R_s \dots\dots\dots(2.5)$$

ผลรวมของ P_{mech} และ P_{core} เราเรียกว่ากำลังสูญเสียในการหมุน (rotation loss ; P_{rot}) ซึ่งเป็นค่าคงที่หาได้จาก

$$P_{rot} = P_{nl} - 3 (I_{nl})^2 R_s \dots\dots\dots(2.6)$$

ความต้านทานของสเตเตอร์ (R_s) หาได้จากการวัดค่าความต้านทานของขดลวดที่สเตเตอร์ (Resistance Test) ดังที่อธิบายในหัวข้อต่อไป

สำหรับวงจรเทียบเคียงของมอเตอร์อินดักชันในการทดสอบขณะไม่มีโหลดดังรูป 9



รูป 9 วงจรเทียบเคียงของมอเตอร์อินดักชันในการทดสอบขณะไม่มีโหลด

ขณะไม่มีโหลด มอเตอร์ชนิดนี้มีค่า power factor ต่ำ แสดงว่าองค์ประกอบของวงจรเทียบเคียงส่วนใหญ่เป็นรีแอกแตนซ์ ซึ่งย่อหมายถึงรีแอกแตนซ์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก (X_m) เพราะค่า R_s และ X_s น้อยเมื่อเทียบกับ X_m [ถ้าเป็นมอเตอร์แบบดั้งเดิม (conventional motor) ค่า $X_m \gg X_s$] ดังนั้นกระแสไฟฟ้า I_{nl} จะต้องล้าหลังแรงดัน V_{nl} เขียนเฟสเซอร์โคอะแกรมดังรูป

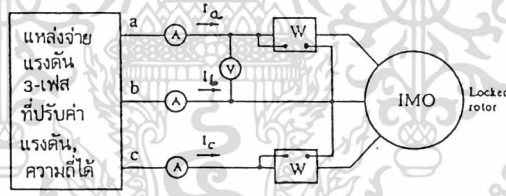
แต่สำหรับความต้านทานที่เป็นองค์ประกอบของ P_{rot} (คือ R_{rot}) จะมีค่าสูงเมื่อเทียบกับ X_m ทำให้กระแสไฟฟ้าที่เป็นองค์ประกอบของ P_{rot} (คือ I_{rot}) มีค่าต่ำมาก เมื่อเทียบกับ I_m ซึ่งภายใต้ข้อสมมุตินี้จะได้อีก

$$X_m = \frac{Vnl}{\sqrt{3}Inl} \dots\dots\dots(2.7)$$

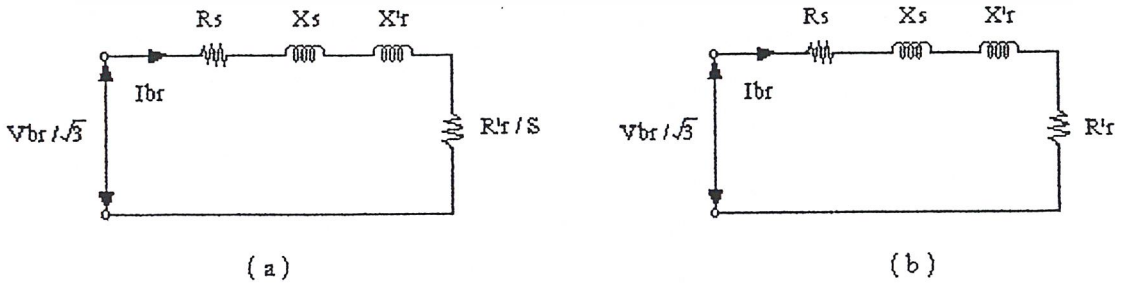
เมื่อ $X_m =$ รีแอกแตนซ์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก

- การทดสอบยัดโรเตอร์ (Blocked-rotor Test)

ขณะทำการทดสอบจะต้องปรับแรงดันไฟฟ้าจนได้กระแสไฟฟ้าที่พิกัดของสเตเตอร์(เช่นเดียวกับกรณีทดสอบลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า) สมมุติแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้การทดสอบมีค่า 10-20 % ของแรงดันไฟฟ้าที่พิกัด ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่ Air gap มีค่าน้อยแสดงว่า X_m มีปริมาณมากกว่าปกติ ดังนั้นเราจึงไม่สนใจค่า X_m ทำให้เขียนวงจรเทียบเคียงได้ใหม่ และเนื่องจากการทดสอบนี้โรเตอร์ถูกยัดไม่ให้หมุน ($N_r = 0$) ทำให้ค่าสลิปเท่ากับ 1 หรือ 100 % ส่งผลให้ $R'R/s = R'R$ จึงเขียนวงจรเทียบเคียงใหม่ดังรูป 11



รูป 10 การต่อ Induction motor และอุปกรณ์เพื่อการทดสอบ โดยยัดโรเตอร์ไว้หนึ่ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูป 11 วงจรเทียบเคียงการทดสอบยัดโรเตอร์
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบนี้เพื่อหาค่าต่อไปนี้

V_{BR} = แรงดันไฟฟ้าที่สายขณะยึดโรเตอร์

I_{BR} = กระแสไฟฟ้าที่สายขณะยึดโรเตอร์

P_{BR} = กำลังไฟฟ้าทั้งสามเฟสขณะยึดโรเตอร์

เมื่อทราบค่าดังกล่าวประกอบกับการพิจารณารูป ทำให้หาค่าที่ขบเคียงของมอเตอร์ดังนี้คือ

$$Z_e = \frac{V_{BR}}{\sqrt{3} I_{BR}} = (R_s + R'_r) + j(X_s + X'_r) \dots\dots\dots(2.8)$$

$$R_e = \frac{P_{BR}}{3(I_{BR})^2} = R_s + R'_r \dots\dots\dots(2.9)$$

$$X_e = \sqrt{Z_e^2 - R_e^2} = X_s + X'_r \dots\dots\dots(2.10)$$

เมื่อ Z_e = อิมพีแดนซ์ที่ขบเคียงต่อเฟสของมอเตอร์

R_e = ความต้านทานที่ขบเคียงต่อเฟสของมอเตอร์

X_e = รีแอกแตนซ์ที่ขบเคียงต่อเฟสของมอเตอร์

Z_s = อิมพีแดนซ์ต่อเฟสของขลวดที่สเตเตอร์

R_s = ความต้านทานต่อเฟสของขลวดที่สเตเตอร์

X_s = รีแอกแตนซ์ต่อเฟสของขลวดที่สเตเตอร์

การวัดค่า R_s จะแยกต่างหาก ทำให้ได้ความต้านทานของโรเตอร์ที่ย้ายค่ามายังด้านสเตเตอร์(R'_r) มีค่าเป็น

$$R'_r = R_e - R_s \dots\dots\dots(2.11)$$

มีข้อสมมุติเกี่ยวกับมอเตอร์แบบ wound rotor ที่ยอมรับกันทั่วไปว่า

$$X_s = X'_r = 0.5 X_e \dots\dots\dots(2.12)$$

การหาค่ารีแอกแตนซ์และความต้านทานที่แท้จริงของโรเตอร์ (X_r และ R_r) จะต้องทราบค่า X'_r และ R'_r รวมทั้งค่าอัตราส่วนจำนวนรอบของขลวดหรืออัตราส่วนของการย้ายค่า (Turn ratio or Transformer ratio : a) เสียก่อน

การหาค่า a ทำให้เห็นเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้า คือ ใช้อัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่สายที่จ่ายให้กับสเตเตอร์ (V_L) กับแรงดันไฟฟ้าที่โรเตอร์หรือแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากสลีปรिंग (V_{SR}) หรือหาได้จากอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดทั้งสองซึ่งเขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$a = V_L / V_{SR} = N_s / N_r \quad \dots\dots\dots(2.13)$$

เมื่อ N_s = จำนวนรอบของขดลวดต่อเฟสในสเตเตอร์

N_r = จำนวนรอบของขดลวดต่อเฟสในโรเตอร์

เมื่อนำหลักการย้ายค่าของหม้อแปลงมาใช้ ค่ารีแอกแตนซ์ที่แท้จริงของโรเตอร์ (X_R) จึงมีค่าเป็น

$$X_R = X'_R / a^2 \quad \dots\dots\dots(2.14)$$

ในทำนองเดียวกัน ความต้านทานแท้จริงของโรเตอร์ (R_R) จะมีค่าเป็น

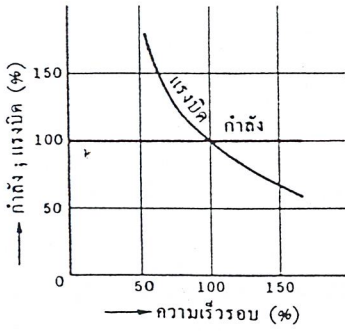
$$R_R = R'_R / a^2 \quad \dots\dots\dots(2.15)$$

2.1.5 การพิจารณาวิเคราะห์สมบัติของโหลด

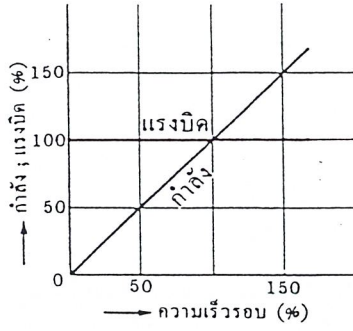
1. สมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบ

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของโหลดและแรงบิดที่ใช้ในการขับโหลดที่ความเร็วต่างๆ เรียกว่าสมบัติความสัมพันธ์แรงบิด-ความเร็วรอบของโหลด เครื่องจักรโหลดมีสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบ ตามสภาพเฉพาะของโครงสร้าง, สมบัติขณะเดินเครื่อง ฯลฯ ซึ่งจะเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการเลือกใช้มอเตอร์

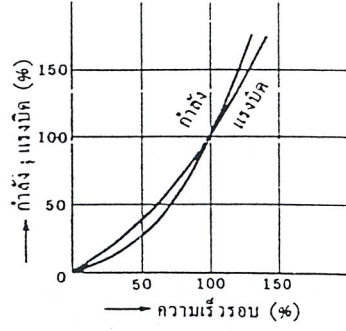
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ชนิดโหลดมีกำลังคงที่



(ข) ชนิดโหลดมีแรงบิดคงที่



(ค) ชนิดโหลดมีแรงบิดลดลงเป็นกำลังสองของความเร็วรอบ

รูป 12 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดขณะโหลดต่างๆ

ตาราง 1 สมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบของโหลด

สมบัติ	ความเกี่ยวข้องระหว่างความเร็วรอบและแรงบิด		ตัวอย่างโหลด
	กับแรงบิด	กับกำลัง	
โหลดกำลังคงที่	แรงบิดแปรกับความเร็วรอบ $T \propto \frac{1}{n}$	กำลังคงที่ $P = \text{ตัวคงค่า}$	(โหลดแบบพิเศษ) บันจัน, เครื่องปั้นไฟแบบกำลังคงที่, เครื่องไสตัดเหล็ก
โหลดแรงบิดคงที่	แรงบิดคงที่ $T = \text{ตัวคงค่า}$	กำลังแปรตามความเร็วรอบ $p \propto n$	(โหลดความถี่ต่างๆ, โหลดแรงดึงคูด น้ำหนัก ฯลฯ) สายพานส่งของเครื่องพิมพ์, เครื่องทำกระดาษ, เครื่องปั้นด้าย, เครื่องกระทุ้งอัดโน้มติ, บี้มลูกสูบ
ขณะแปรตามกำลังสองของความเร็วรอบเมื่อแรงบิดโหลดลดลง	แรงบิดแปรตามกำลังสองของความเร็วรอบ $T \propto n^2$	กำลังแปรตามกำลังสามของความเร็วรอบ $p \propto n^3$	(โหลดของไหล) โบลเวอร์ บีมแรงเหวี่ยง

2. แรงบิดขณะเริ่มสตาร์ทและแรงบิดสูงสุดของเครื่องจักรโหลด

ในการเลือกมอเตอร์ค่าแรงบิดขณะเริ่มสตาร์ทและแรงบิดสูงสุดของเครื่องจักรโหลด และขนาดกำลังที่มีอยู่ มีส่วนในการพิจารณารวมอย่างละเอียดเพื่อใช้ในการเลือกมอเตอร์ให้มีสมบัติแรงบิดที่เหมาะสม ขนาดของแรงบิดขณะเริ่มสตาร์ทและแรงบิดสูงสุดของมอเตอร์มักแสดงในรูปเปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบให้ค่าแรงบิดเต็มพิกัดเป็น 100% ถ้าทราบพิกัด (KW) และพิกัดความเร็วรอบ (รอบต่อนาที) ซึ่งบอกไว้ที่ป้ายชื่อ ค่าแรงบิดเต็มพิกัดจะสามารถหาได้จากการคำนวณโดยอาศัยเอกสารเป็นเอกสารที่ส่งวันเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ค่าแรงบิดเต็มพิกัด} = \frac{\text{ค่าพิกัดกำลัง(kW)} * 974 \text{ (kg/m)}}{\text{ค่าความเร็วรอบเต็มพิกัด(rpm)}}$$

3. สมบัติแรงบิดที่ต้องการในการเดินเครื่องอย่างมีเสถียรภาพ

ถ้าที่เพลลาของมอเตอร์มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยรวมเท่ากับ J (kg/m²) และมีค่าแรงบิดของมอเตอร์เท่ากับ T_m (Nm) และมีค่าแรงบิดที่ต้องการของโหลดเท่ากับ T_l (Nm) สมการของการเคลื่อนที่จะได้เป็น

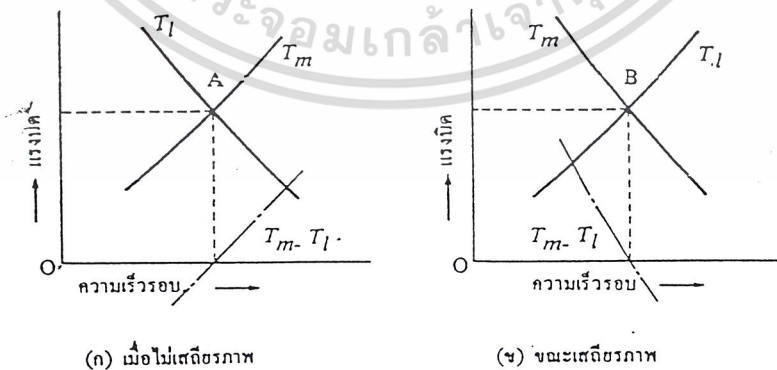
$$J a_\theta = T_m - T_l$$

เมื่อ a_θ เป็นอัตราเร่งเชิงมุม

ถ้า $T_m = T_l$ ที่จุดความเร็วรอบอันใดอันหนึ่ง จะทำให้ $a_\theta = 0$ ทำให้อัตราเร่งและการเดินเครื่องใช้งานก็จะอยู่ในสภาพสมดุลที่จุดดังกล่าว (จุด A หรือ B รูป 13)

อย่างไรก็ดีถ้าความเร็วรอบเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (ดูรูป 13 ก) จะทำให้ $T_m - T_l$ เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดความเร่งซึ่งจะทำให้เกิดการเสถียรภาพขึ้น ดังนั้นมอเตอร์ที่มีสมบัติแรงบิดดังแสดงไว้จะไม่เหมาะสมกับโหลดซึ่งมีสมบัติแรงบิดดังกล่าวเช่นกัน

ในการเดินเครื่องให้เกิดเสถียรภาพจะต้องให้มอเตอร์และโหลดมีสมบัติแรงบิดดังแสดงไว้ในรูป 13 ข

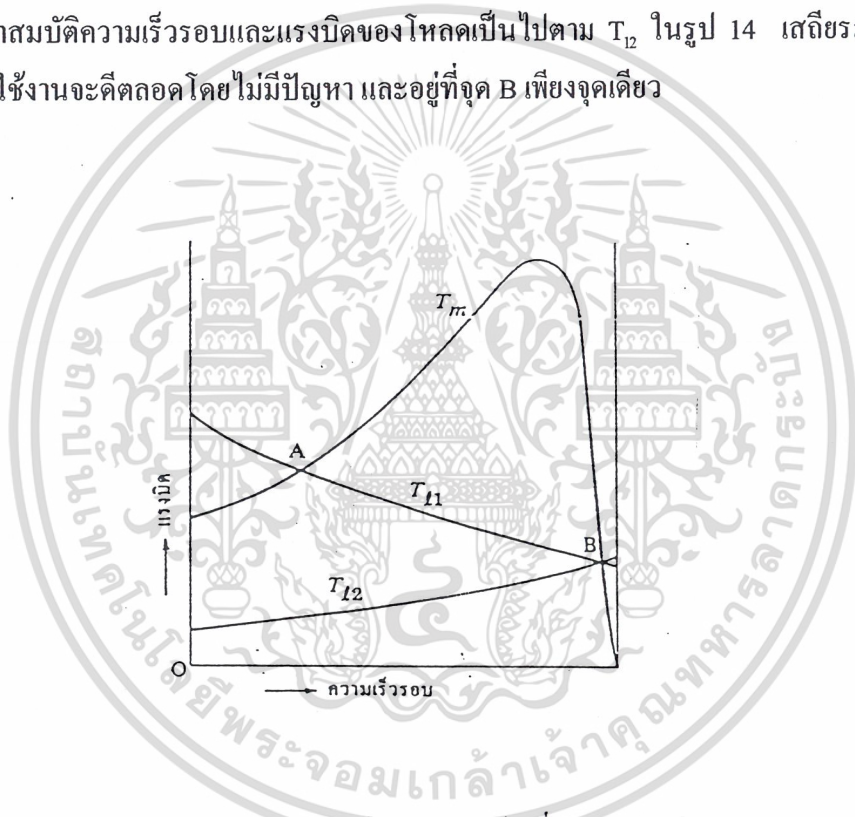


รูป 13 จุดสมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยกตัวอย่างรูป 14 พิจารณากรณีขนะโหลดซึ่งมีสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบ T_{11} โดยมีมอเตอร์เหนี่ยวนำโรเตอร์พันขดลวดเป็นกำลัง มีสมบัติความเร็วรอบ T_m จะเห็นว่าค่าของแรงบิดขนะเริ่มสตาร์ทของมอเตอร์มีขนาดต่ำกว่าแรงบิดที่โหลดต้องการ ดังนั้นระบบรวมจะไม่สามารถสตาร์ทขึ้นได้ อย่างไรก็ตามก็คิขนะปรับค่าความต้านทานด้านทุติยภูมิของมอเตอร์ให้สูงขึ้น จะสามารถสตาร์ทได้ที่จุด A เป็นจุดสมคูลย์ที่ไม่มีเสถียรภาพ ซึ่งเป็นไปตามรูป (13 ก) อย่างไรก็ตามก็ถ้าเกิดการเร่งและนำเข้าสู่จุดที่มีเสถียรภาพใหม่ที่จุด B (ซึ่งพิจารณาตามรูป 13 ข) จะสามารถเดินเครื่องใช้งานที่จุดนั้นได้เหมาะสม

ถ้าสมบัติความเร็วรอบและแรงบิดของโหลดเป็นไปตาม T_{12} ในรูป 14 เสถียรภาพในการเดินเครื่องใช้งานจะดีตลอดโดยไม่มีปัญหา และอยู่ที่จุด B เพียงจุดเดียว



รูป 14 จุดสมคูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

2.1.6 การคำนวณหากำลังที่ต้องการขับโหลดคงที่

การเคลื่อนย้ายวัสดุในด้านแนวนอน เมื่อวัสดุมีขนาด W (kg) เคลื่อนย้ายไปตามแนวนอนด้วยความเร็วคงที่ V (m/s) กำหนดให้สัมประสิทธิ์ของความฝืดเท่ากับ μ ขนาดกำลังที่ต้องใช้ของมอเตอร์ P หาได้จากสมการ 2.23 คือ

$$P_m = \frac{\mu W V * 100}{102 * \eta} \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ดีเช่นเดียวกับการคำนวณในหัวข้อที่แล้วการเลือกขนาดกำลังของมอเตอร์ที่จะใช้ ต้องคำนึงรวมเผื่อถึงความไม่สม่ำเสมอของแรงบิดเริ่มสตาร์ทจากค่าของศักดาไฟฟ้าป้อนเข้าและ แฟลคเตอร์ความปลอดภัยในการออกแบบและการสร้างประกอบกันไป

- การเลือกพิกัดเวลาใช้งาน

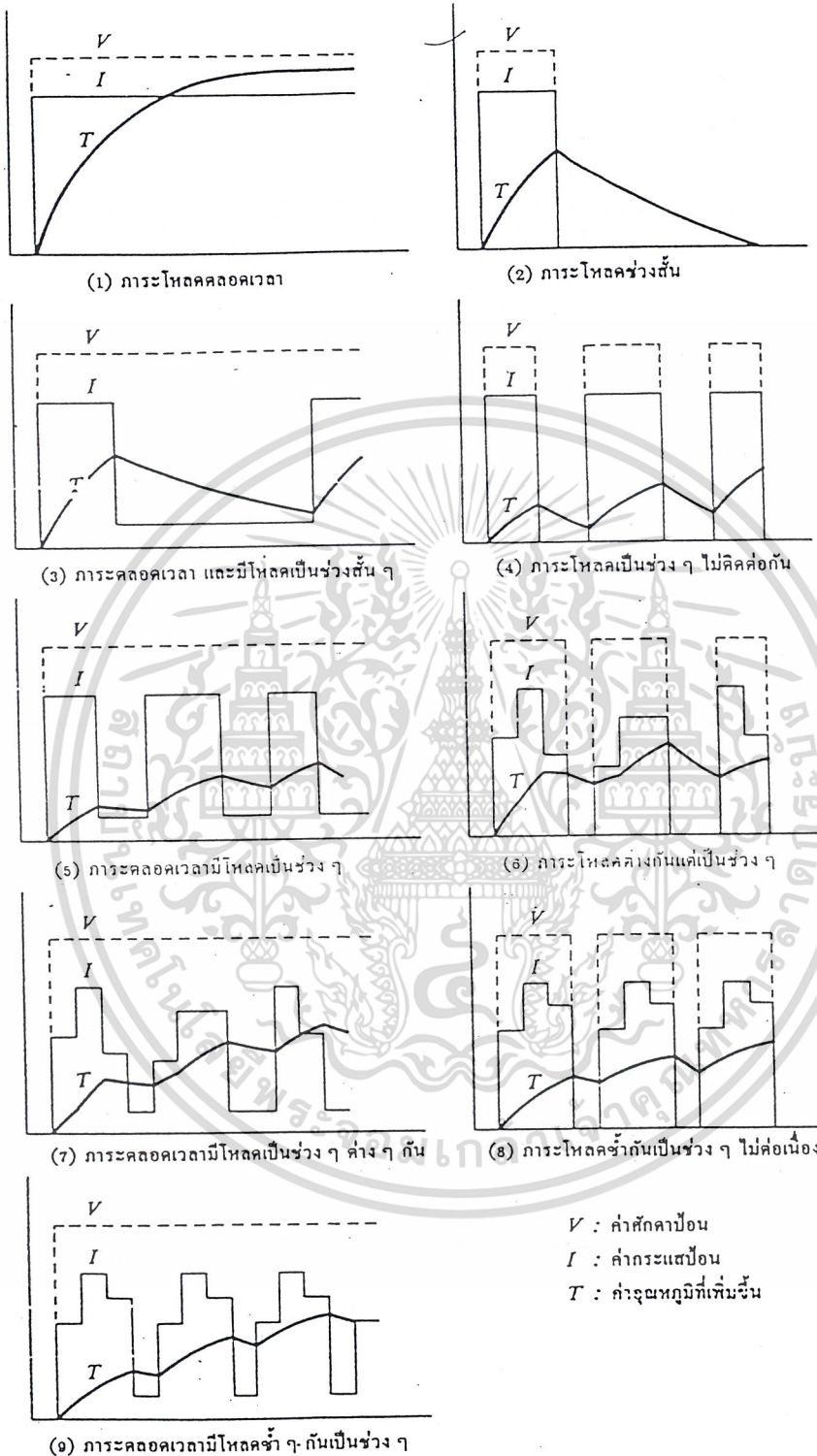
การใช้มอเตอร์มีการใช้หลายอย่างซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดและสภาพของเครื่องจักรโหลดเป็นสำคัญ ยกตัวอย่างเช่นมอเตอร์ที่ใช้ในงานโบลเวอร์เป่าอากาศจะสตาร์ทขณะเริ่มทำงานและทำงานเรื่อยไปที่โหลดคงที่ตลอดเวลาจนกระทั่งเลิกงานเป็นเวลาติดต่อกันหลายชั่วโมงหรือมอเตอร์เครื่องสูบน้ำขณะเดินเครื่องจะมีโหลดเกือบคงที่เช่นเดียวกันอาจเดินครั้งละ 15 นาทีแล้วหยุดพักส่วนมอเตอร์เครื่องกลึงอาจเดินติดต่อกันเป็นช่วงๆ โดยมีการสตาร์ทโหลดเต็มที่โหลดเบาและหยุดเครื่องคั้งนั้นจะเห็นว่ามีความจำเป็นที่จะต้องเลือกใช้มอเตอร์ตามประเภทของงานที่ต้องการ (ตาราง 2) และลักษณะของการใช้งาน โหลด ประเภทต่าง ๆ แสดงไว้ในกราฟรูป 15

ตาราง 2 ชนิดของพิกัดการใช้งาน

ชนิดของพิกัด	การใช้งาน
พิกัดใช้งานต่อเนื่อง	สามารถใช้งานต่อเนื่องที่พิกัดกำลังได้ (รูป 15(1))
พิกัดใช้งานช่วงสั้น	สามารถใช้งานในช่วงสั้น (เช่น 30 นาทีหรือ 1 ชั่วโมง) ที่พิกัดกำลัง (รูป 15 (2))
พิกัดใช้งานเป็นช่วง ๆ	สามารถใช้งานต่อเนื่องเป็นช่วง ๆ ปิดเปิด สลับกันไป หรือใช้งานมีโหลดและไร้โหลดในระหว่างการทำงานต่อเนื่องกัน (รูป15 (8) (9))

ถ้าพิจารณาการใช้งานในรูป 15 (3)-(7) จะเห็นว่ามอเตอร์ที่เหมาะสมในการเลือกใช้จะเป็นมอเตอร์ที่มีพิกัดต่อเนื่อง หรือพิกัดกำลังช่วงสั้น ทั้งนี้ประกอบกับการพิจารณาขนาดรวมของการใช้งานในแต่ละกรณี โดยอาศัยการพิจารณาจากหัวข้ออื่น ๆ ดังกล่าวมาแล้วด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 15 ชนิดของภาระโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอก (Squirrel Cage Type) นิยมใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากมอเตอร์ชนิดนี้มีราคาถูกและมีโครงสร้างที่แข็งแรงทนทาน เมื่อเราป้อนไฟให้กับมอเตอร์นี้โดยตรงจากระบบไฟฟ้า มอเตอร์เหนี่ยวนำจะหมุนที่ความเร็วที่ค่อนข้างจะคงที่ แต่อย่างไรก็ตามด้วยวิธีการทาง Power Electronics แล้ว เราสามารถที่จะปรับเปลี่ยนความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ โดยใช้วิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ(Induction Motor Drives) ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ตามชนิดของการใช้งานคือ

1. การขับเคลื่อนที่สามารถปรับความเร็วได้ (Adjustable-Speed Drives)
2. การขับเคลื่อนแบบเซอร์โว (Servo Drives)

ใจความสำคัญของบทนี้จะอยู่ที่การให้ความเข้าใจในพฤติกรรมของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ โดยความเร็วที่เราจะควบคุมนั้นไม่ต้องการความแม่นยำมากนัก นอกจากประโยชน์ที่เราจะได้รับจากการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้แล้วนั้น ยังมีผลพลอยได้อีกอย่างอื่นซึ่งมีประโยชน์เกิดขึ้นตามมาด้วย ก็คือการประหยัดพลังงาน

2.2.1 หลักการเบื้องต้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอก 3 เฟส ซึ่งสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำประกอบด้วยขดลวด 3 เฟส โดยขดลวดเหล่านี้จะวางห่างกัน 120 องศาไฟฟ้า โรเตอร์กรงกระรอกประกอบด้วยแผ่นเหล็ก Laminated อัดทับซ้อนกันอยู่และมีแท่งตัวนำสอดทะลุแผ่นเหล็กเหล่านั้น โดยรอบและจะตัดวงจรแท่งเหล็กเหล่านั้นทั้งทางด้านหัวและท้ายของโรเตอร์ด้วยแหวนที่เรียกว่า “End Ring” จากที่กล่าวมาแล้วจะเห็นว่าเป็นรูปแบบอย่างง่ายราคาถูกและทนทาน การที่เราใช้รูปแบบง่าย ๆ ก็เพื่อให้เราสามารถวิเคราะห์และอธิบายการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำร่วมกับ Power Electronics Converter ได้ง่าย และค่าคงที่ในการแปรผันระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ของมอเตอร์จะแสดงด้วย Kj นอกจากนั้นเรายังกำหนดการทำงานของมอเตอร์โดยปราศจากการอิมิตัวของสนามแม่เหล็กด้วย

ถ้าเราจ่ายแรงดัน 3 เฟส สมดุลย์ที่มีลักษณะรูปคลื่นไซน์ มีความถี่ $f = \omega/2\pi$ ให้กับขดลวดสเตเตอร์ ทำให้เกิดกระแสสามเฟสสมดุลขึ้นและสร้างความหนาแน่นของฟลักซ์ Φ ในช่องอากาศซึ่งมีลักษณะดังนี้ : (1) มีขนาดคงที่ และ (2) เคลื่อนที่หรือหมุนด้วยความเร็วคงที่หรือที่เรา เรียกว่า ความเร็วเชิงโคโรนัส หรือ ω_s มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที (Rad/sec) ความเร็วเชิงโคโรนัสของมอเตอร์ที่มีจำนวนขั้วแม่เหล็ก P ขั้ว ที่ได้จากความถี่ f แสดงได้ดังนี้ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$\omega_s = \frac{2\omega/P}{\dots\dots\dots} \text{ (Rad/sec)} \dots\dots\dots(2.2.1)$$
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยความเร็วนี้จะเกิดขึ้นอยู่กับความถี่ f ของแรงดันและกระแสที่ขดลวดสเตเตอร์ ความเร็วเชิงโคโรนัสในรูป rpm (Revolution per Minute) คือ

$$N_s = 60 \times \omega_s / 2\pi = 120f/p \quad \dots\dots\dots(2.2.2)$$

ฟลักซ์ในช่องอากาศ ϕ_{ag} (เกิดเนื่องจากการกระจายของความหนาแน่นของฟลักซ์ Bag) จะหมุนที่ความเร็วเชิงโคโรนัสรอบๆ ขดลวดสเตเตอร์ที่อยู่กับที่ ดังนั้นจะเกิด Counter-Emf หรือที่เรียกว่า Air-gap Voltage , E_{ag} หนีวนำขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ซึ่งมีความถี่เท่ากับ f ดังแสดงด้วยวงจรสมมูลย์ต่อเฟสในรูป 16 a เมื่อ V_s คือแรงดันต่อเฟส โดยที่ R_s คือ ความต้านของขดลวดสเตเตอร์ และ L_s คือ ความเหนี่ยวนำรั่วไหลของขดลวดสเตเตอร์ องค์ประกอบทางแม่เหล็ก I_m ของกระแสสเตเตอร์ I_s จะสร้างฟลักซ์แม่เหล็กในช่องอากาศ เราจะได้

$$N_s \phi_{ag} = L_m I_m \quad \dots\dots\dots(2.2.3)$$

เมื่อ L_m คือ ค่าความเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กแสดงในรูป 3-1a) จากกฎของฟาราเดย์

$$E_{ag} = N_s d/dt(\phi_{ag}) \quad \dots\dots\dots(2.2.4)$$

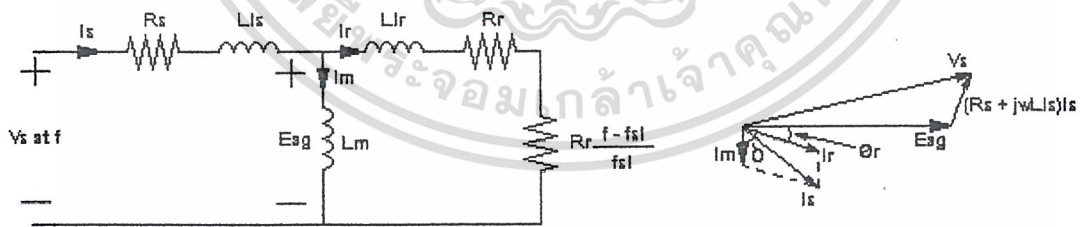
เมื่อฟลักซ์ในช่องอากาศที่คด้องขดลวดสเตเตอร์เป็น $\phi_{ag}(t) = \phi_{ag} \sin \omega t$ จากสมการที่ 2.2.4) จะได้

$$E_{ag} = N_s \omega \phi_{ag} \cos \omega t \quad \dots\dots\dots(2.2.5)$$

ดังนั้นค่าใช้งาน (Root Mean Square) จะได้เป็น

$$E_{ag} = K_3 f \phi_{ag} \quad \dots\dots\dots(2.2.6)$$

เมื่อ K_3 คือค่าคงที่



a) วงจรสมมูลย์

b) Phasor Diagram

รูป 16 แสดงวงจรสมมูลย์ในรูปต่อเฟส

แรงบิดในมอเตอร์หนีวนำ เกิดจากการทำปฏิกิริยาของฟลักซ์ในช่องอากาศกับกระแสในโรเตอร์ ถ้าโรเตอร์หมุนที่ความเร็วเชิงโคโรนัส จะไม่เกิดความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ระหว่าง ϕ_{ag} กับโรเตอร์ และจะไม่เกิดการเหนี่ยวนำแรงดันที่โรเตอร์ด้วย ดังนั้นจะไม่เกิดกระแสขึ้นที่โรเตอร์ เมื่อไม่เกิดกระแสที่โรเตอร์ก็จะไม่เกิดแรงบิดด้วย ที่ค่าความเร็วโรเตอร์ ω_r อื่น ๆ ที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดเบี่ยงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทิศทางการหมุนเหมือนกับทิศทางการหมุนของฟลักซ์ในช่องอากาศ มอเตอร์จะเกิดการลื่นไถล (Slip) โดยเทียบความเร็วของโรเตอร์กับความเร็วของฟลักซ์ในช่องอากาศ ซึ่งความสัมพันธ์ของความเร็วจึงเกิดขึ้นเราเรียกว่า ความเร็วของการลื่นไถลหรือความเร็วสลลิป (Slip Speed : ω_{sl}) โดยหาได้จาก

$$\omega_{sl} = \omega_s - \omega_r \quad \dots\dots\dots(2.2.7)$$

ความเร็วสลลิปนี้เป็นสิ่งที่ต้องเกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งเราจะเรียกว่าสลลิป

$$\text{Slip, } S = \frac{\text{Slip Speed}}{\text{Synchronous Speed}} = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad \dots\dots\dots(2.2.8)$$

ดังนั้นความเร็วสลลิปจะได้เป็น

$$\text{Slip Speed, } \omega_{sl} = \omega_s - \omega_r = S\omega_s \quad \dots\dots\dots(2.2.9)$$

จากกฎของฟาราเดย์ ความถี่สลลิป f_{sl} ซึ่งแปรผันตามความเร็วสลลิปเป็น

$$f_{sl} = \frac{\omega_{sl}}{\omega_s} \times f = S f \quad \dots\dots\dots(2.2.10)$$

ขนาด E ของแรงดันที่มีความถี่เท่ากับความถี่สลลิป ค่าแรงดันเหนี่ยวนำ E_r ในโรเตอร์จะ

$$E_r = K_3 f_{sl} \phi_{ag} \quad \dots\dots\dots(2.2.11)$$

แรงดันเหนี่ยวนำในโรเตอร์ที่ความถี่สลลิปสร้างกระแสโรเตอร์ I_r ขึ้นมาและมีความถี่เท่ากับ

$$E_r = R_r I_r + j2\pi f_{sl} L_r I_r \quad \dots\dots\dots(2.2.12)$$

เราสามารถหาค่าสูญเสียในขดลวดโรเตอร์ (สูญเสียเนื่องจากความต้านทานภายในขดลวด)

$$P_r = 3R_r I_r^2 \quad \dots\dots\dots(2.2.13)$$

ดังนั้นจะได้

$$E_{ag} = E_r / f_{sl} = I_r f R_r / f_{sl} + j2\pi f_{sl} L_r I_r \quad \dots\dots\dots(2.2.14)$$

เพราะฉะนั้นเราจะได้ว่ากำลังงานที่ข้ามช่องอากาศหรือเราเรียกว่า Air-gap Power , P_{ag}

ดังนี้

$$P_{ag} = 3R_r I_r^2 / f_{sl} \quad \dots\dots\dots(2.2.15)$$

ค่ากำลังไฟฟ้าทางกล P_{em} (Electromechanical Power) สามารถคำนวณได้จาก

$$P_{em} = P_{ag} - P_r = 3R_r I_r^2 (f - f_{sl}) / f_{sl} \quad \dots\dots\dots(2.2.16a)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า และ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_{em} = P_{em}/\omega_r = P_{ag}/\omega_s \dots\dots\dots(2.2.16b)$$

กระแสรวม I_s ที่จ่ายเข้าสู่สเตเตอร์เป็นผลรวมของกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก I_m กับกระแสที่ไหลผ่านวงจรมวลย์โรเตอร์ I_r

$$I_s = I_m + I_r \dots\dots\dots(2.2.17)$$

กระแส I_r ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ทำให้เกิดแรงบิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะล้าหลัง E_{ag} เป็นมุมตัวประกอบกำลังของวงจรโรเตอร์ θ_r (Power Factor Angle of Rotor Circuit)

$$\theta_r = \tan^{-1} (2\pi f_s L_r f_{sl} / R_r) \dots\dots\dots(2.2.18)$$

จากทฤษฎีของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแรงบิดที่เกิดขึ้น คือ

$$T_{em} = K_4 \phi_{ag} I_r \sin \delta \text{ เมื่อ } \delta = 90^\circ + \theta_r \dots\dots\dots(2.2.19)$$

ค่าของแรงดันที่จ่ายให้กับขลวดสเตเตอร์ V_s หาได้จาก

$$V_s = E_{ag} + (R_s + j2\pi f_s L_s) \times I_s \dots\dots\dots(2.2.20)$$

ในสภาวะความเป็นจริงมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ออกแบบโดยทั่วไป ค่าของ f_{sl} จะมีค่าค่อนข้างต่ำ ซึ่งมีผลทำให้

$$2\pi f_{sl} L_r \gg R_r \dots\dots\dots(2.2.21)$$

ดังนั้น θ_r ในสมการที่ 2.2.18) จะมีค่าประมาณ 0 และมุมแรงบิด δ ในสมการ 2.2.19) จะมีค่าเท่ากับ 90 องศา ดังนั้นในสมการที่ 2.2.19) จะกลายเป็น

$$T_{em} = K_4 \phi_{ag} I_r \dots\dots\dots(2.2.22)$$

จากสมการที่ 2.2.11) และ 2.2.12) ให้ใช้ค่าประมาณจากสมการที่ 2.2.21) จะได้

$$I_r \approx K_5 \phi_{ag} f_{sl} \dots\dots\dots(2.2.23)$$

รวมสมการที่ 2.2.22) และ 2.2.23) จะให้ผลดังนี้คือ

$$T_{em} \approx K_6 \phi_{ag}^2 f_{sl} \dots\dots\dots(2.2.24)$$

จากค่าประมาณในสมการที่ 2.2.21) จะสัมพันธ์กับสมการที่ 2.2.17) ด้วย ดังนั้นจะได้ว่า

$$I_s \approx (I_m^2 + I_r^2)^{1/2} \dots\dots\dots(2.2.25)$$

สำหรับค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ปกติทั่ว ๆ ไป จะทำให้ผลของสมการที่ 2.2.20) เป็นดังนี้(ยกเว้นการปฏิบัติงานที่ความถี่ต่ำ ๆ)

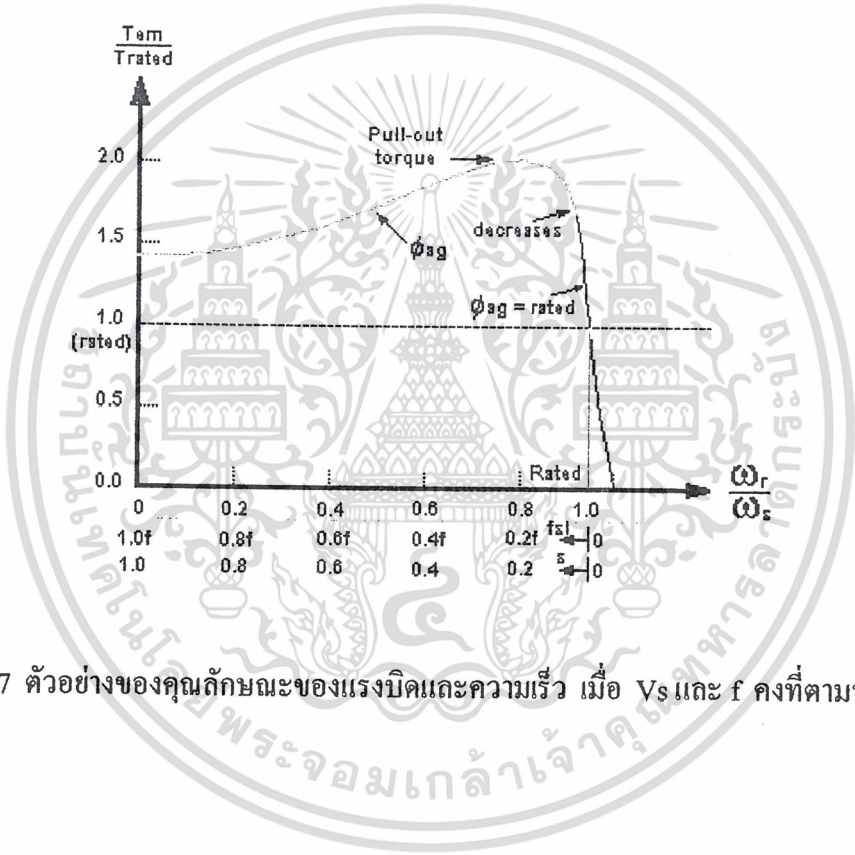
$$V_s \approx E_{ag} \dots\dots\dots(2.2.26)$$

2.2.2 คุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่พิกัด (Line) ความถี่และที่พิกัดแรงดัน

ตัวอย่างของคุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำภายใต้ความถี่ และแรงดันที่ระบุไว้ใน

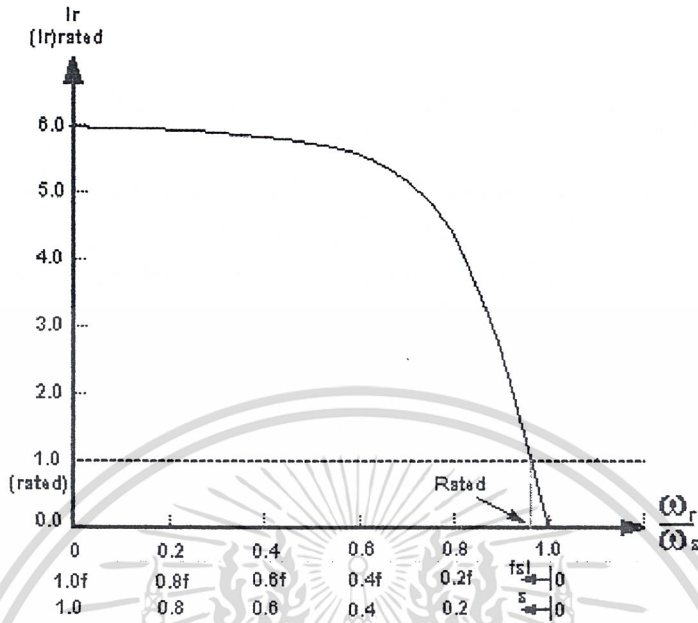
เอกสาร Nameplate แสดงไว้ในรูป 17) และ 18) โดยในรูป 18) แสดง T_{em} ซึ่งเป็นฟังก์ชันความเร็วของการค้าโรเตอร์และ f_{sl} ในรูป 19) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความถี่โรเตอร์และ f_{sl} ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าเราต้องการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ เราต้องพยายามรักษาค่าของ fsl ให้มีค่าน้อยๆ เพื่อเราจะได้ไม่ต้องพิจารณาส่วนที่เป็นเส้นปะซึ่งแสดงในรูป 18) และ 19) แต่อย่างไรก็ตาม ถ้าเราเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยปราศจากอุปกรณ์ควบคุมทาง Power Electronic กระแสขณะเริ่มต้นจะสูงถึงประมาณ 6-8 เท่าของกระแสที่พิกัดดังแสดงในรูป 18) และในรูป 19) แสดงแรงบิดเพื่อการเร่ง ($T_{em} - T_{load}$) ของมอเตอร์ โดยแรงบิดนี้เป็นตัวช่วยเร่งความเร็วมอเตอร์ให้สูงขึ้นจากจุดหยุดนิ่ง ในรูป 19) นี้ยังแสดงคุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็วของโหลดด้วย จุดตัดของคุณลักษณะของมอเตอร์และโหลดเป็นตัวบอกสภาวะคงตัวของการทำงาน

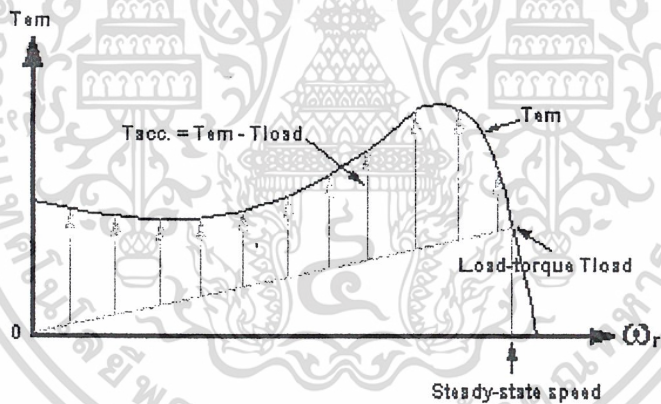


รูป 17 ตัวอย่างของคุณลักษณะของแรงบิดและความเร็ว เมื่อ V_s และ f คงที่ตามพิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 18 แสดงคุณลักษณะของ Ir กับ fsl โดยที่ Vs และ f คงที่ตามพิกัด



รูป 19 การเริ่มเดินของมอเตอร์ (Motor Start-Up) โดยให้ Vs และ f คงที่ตามพิกัด

2.2.3 วิธีการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

วิธีการควบคุมความเร็วรอบของอินดัคชันมอเตอร์นี้ เมื่อพิจารณาสมการความเร็วของมอเตอร์สมการที่ 2.2.27) จะได้

$$N_r = (1 - S) \times 120f/p \quad \text{rpm} \quad \dots\dots\dots(2.2.27)$$

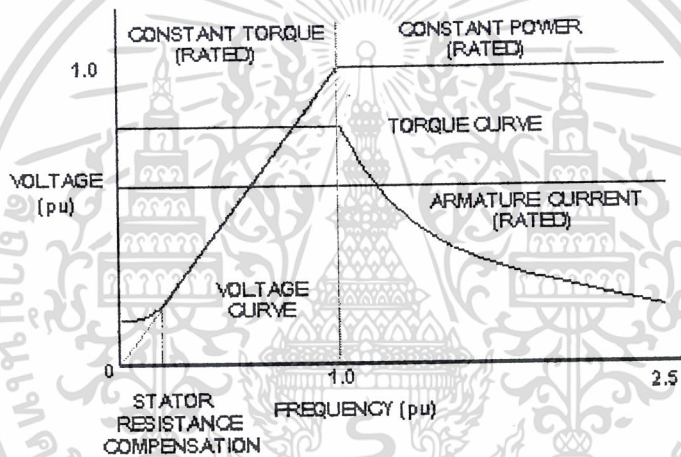
ดังนั้นการควบคุมความเร็วทำได้โดยการควบคุมความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ (f) สลิปของโรเตอร์(S) และจำนวนขั้วของสเตเตอร์(p) และการควบคุมที่เหมาะสมที่สุด คือการควบคุมความถี่ของแหล่งจ่ายไฟโดยใช้อินเวอร์เตอร์ เพราะจะทำให้การควบคุมมีการต่อเนื่อง ประสิทธิภาพของมอเตอร์สูง ในขณะที่การควบคุมความเร็วของอินดัคชันมอเตอร์โดยการเปลี่ยนจำนวนขั้ว จะทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด การค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้จำกัด ช่วงการเปลี่ยนความเร็วแคบและไม่ต่อเนื่อง และใช้ได้กับอินดัคชันที่ออกแบบไว้พิเศษเท่านั้น ส่วนการควบคุมความเร็วของมอเตอร์โดยการควบคุมสลิป ทำได้โดยการเปลี่ยนค่าสลิป ทำให้มอเตอร์มีประสิทธิภาพต่ำลง เพราะประสิทธิภาพของมอเตอร์ขึ้นอยู่กับค่าสลิป ดังนั้นในที่นี้จะขอก้าวถึงเฉพาะการควบคุมความเร็วอินดัคชันมอเตอร์โดยการเปลี่ยนแรงดันและความถี่เท่านั้น

1) การควบคุมด้วยการเปลี่ยนแรงดันและความถี่

เทคนิคนี้เป็นที่รู้จักกันดีและเป็นเทคนิคที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งจะใช้อินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนเพื่อที่จะให้ได้แรงดันและความถี่ที่เอาต์พุตเป็นไปตามที่ความต้องการของหลักการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ แสดงในรูป 20)

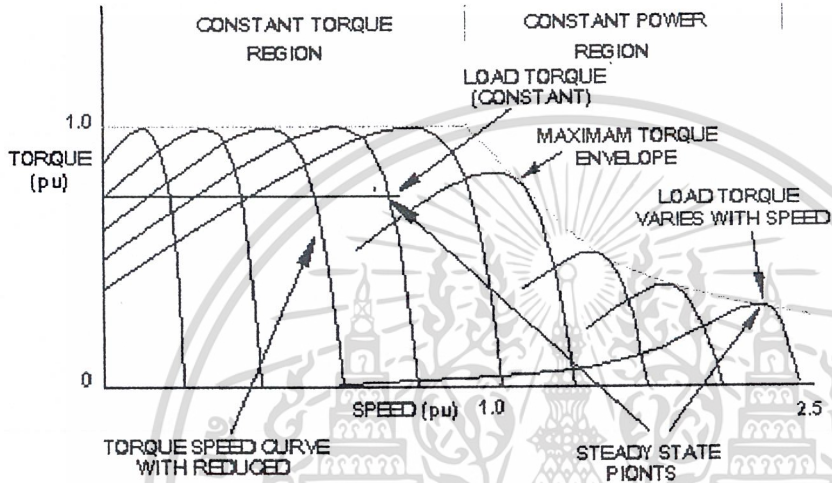


รูป 20 แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน , ทอร์ก , กระแส สเตเตอร์กับความถี่

ชนิดมอเตอร์ที่ใช้จะต้องมีคุณสมบัติ Slip ค่าซึ่งจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและความเร็ว มอเตอร์จะเปลี่ยนตามการเปลี่ยนความเร็วซิงโครนัสของสนามแม่เหล็กในช่องอากาศอยู่ระหว่าง ส่วนสเตเตอร์และโรเตอร์ การที่จะเปลี่ยนความเร็วซิงโครนัสได้นี้สามารถทำได้โดยการแปรเปลี่ยนความถี่ของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งลักษณะการควบคุมความถี่นั้นจะคล้ายกับการควบคุมดิซี มอเตอร์ กล่าวคือ เมื่อต้องการเพิ่มความเร็วของอินดัคชันมอเตอร์ทำได้โดยการเพิ่มความถี่ของแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ แต่การเพิ่มความถี่อย่างเดียวจะทำให้แอมเพิลลักซ์ Φ_{ag} ของมอเตอร์ลดลง เนื่องจากการลดลงของ magnetizing current อันเป็นผลเนื่องมาจากการเพิ่มของ magnetizing reactance ซึ่งเมื่อ Φ_{ag} ลดลงจะทำให้ทอร์กสูงสุดของมอเตอร์ลดลง เพื่อที่จะรักษา ฟลักซ์ในแอมเพิลลักซ์และทอร์กสูงสุดให้คงที่ จำเป็นต้องเพิ่มแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ตามความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยเท่านั้น เพื่อการใช้งานอื่น ๆ กรุณาติดต่อขอสงวนลิขสิทธิ์ไว้ก่อนล่วงหน้า มิฉะนั้นจะถือว่าละเมิดลิขสิทธิ์ การค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับการควบคุมคิซิมอเตอร์ ที่ควบคุมแรงดันอาร์เมเจอร์ และรักษาสนามแม่เหล็กให้คงที่ ทำให้ อินคัซนมอเตอร์มีลักษณะเป็นการขับเคลื่อนที่ให้ทอร์คคงที่ การควบคุมให้อินคัซนมอเตอร์มี ทอร์คสูงสุดคงที่ จะทำได้ในย่านความเร็วที่ต่ำกว่าความเร็วกำหนด (base speed) หรือความถี่ต่ำ กว่า base frequency (1 p.u.) ดังแสดงในรูป 21)



รูป 21 แสดง Speed-torque Curve ของมอเตอร์เมื่อใช้วิธีควบคุมแรงดันและความถี่ที่สเตรเตอร์

ในย่านความถี่ต่ำ ๆ การรักษาให้ V/f คงที่จะไม่เป็นการเพียงพอ ที่จะทำให้ทอร์คสูงสุดมีค่าคงที่ ทั้งนี้เพราะที่ความถี่ต่ำ ๆ magnetizing current ไม่ได้ขึ้นอยู่กับ magnetizing reactance เพียงอย่างเดียว เนื่องจากความต้านทานของสเตเตอร์จะมีค่าใกล้เคียงกับ magnetizing reactance ดังนั้น จะต้องเพิ่มแรงดันที่ต้องจ่ายให้กับสเตเตอร์ของอินคัซนมอเตอร์ เพื่อชดเชยแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานของสเตเตอร์ ทำให้การเปลี่ยนแปลงแรงดันกับความถี่เป็นไปตามเส้นทึบของกราฟรูปที่ 20) แทนการเปลี่ยนแปลงตามเส้นประซึ่งเป็นกราฟ V/f มีค่าคงที่

ส่วนในย่านความเร็วที่สูงกว่า base speed ไม่สามารถรักษาทอร์คได้คงที่ เนื่องจากจะทำให้มอเตอร์ Over Load ซึ่งจะทำให้มอเตอร์เสียหายได้ ดังนั้นจึงรักษาแรงดันให้คงที่ที่กำหนดซึ่งจะทำให้ทอร์คสูงสุดลดลง เนื่องจากการลดลงของ air-gap flux ของอินคัซนมอเตอร์ดังแสดงในรูป 20) การควบคุมความเร็วในย่านนี้กำลังออกสูงสุดของอินคัซนมอเตอร์จะมีค่าคงที่เช่นเดียวกับคิซิมอเตอร์ ด้วยการลดความเข้มของสนามแม่เหล็ก เรียกว่าเป็นการทำงานให้ constant power region หรือ field-weakening region ดังในรูป 21) ซึ่งเป็นทอร์คความเร็วเคิร์ฟของอินคัซนมอเตอร์ สำหรับแรงดันและความถี่ เห็นได้ว่าจุดทำงานอยู่ที่จุดตัดระหว่าง torque-speed curve ของอินคัซนมอเตอร์กับทอร์คโหลด จุด A เป็นจุดทำงานกรณี load torque มีค่าคงที่ ในขณะที่จุด

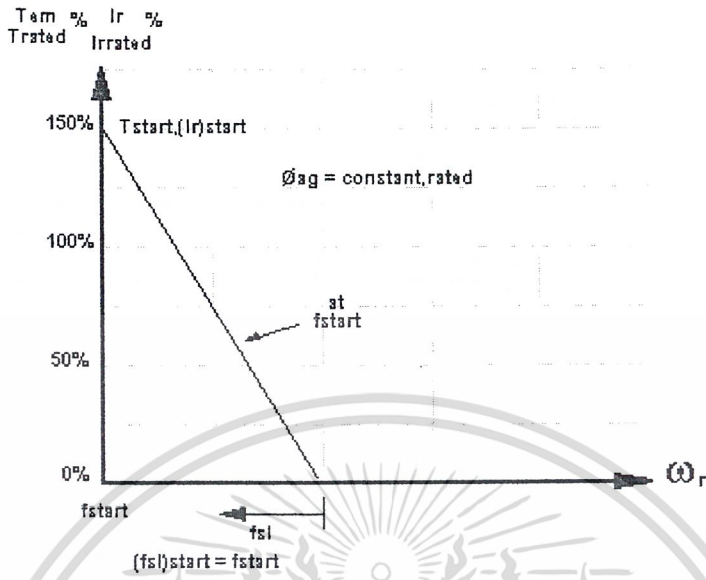
B เป็นจุดทำงานในกรณีที่ load-torque แปรกับความเร็ว เนื่องจากการควบคุมของอินดัคชันมอเตอร์โดยวิธีนี้จะเป็นการแปรทั้งความถี่และแรงดันจึงเรียกการควบคุมนี้ว่า Variable Voltage Variable frequency drive การควบคุมอินดัคชันมอเตอร์ด้วยวิธีนี้จะทำให้สามารถเร่งเครื่องจากความเร็วเป็นศูนย์ไปสู่ความเร็วที่ต้องการ โดยมีทอร์คสูงสุดได้ และสามารถควบคุมให้เข้าสู่สภาวะคงตัว (steady state) นอกจากนี้ในตอนที่ต้องการหยุดอินดัคชันมอเตอร์ อาจควบคุมให้สลีปมีค่าเป็นลบซึ่งจะทำให้อินเวอร์เตอร์ทำงานเป็น Induction generator เปลี่ยนเป็นพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าป้อนกลับเข้าไปยังอินเวอร์เตอร์ถ้ามีการสลายพลังงานนี้ทิ้งไปที่ ตัวความต้านทาน เรียกว่า dynamic breaking หรือถ้าป้อนกลับเข้าเป็น AC Line จะเป็น regenerative breaking ซึ่งทำได้ยากกว่า

เนื่องจากแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไม่ได้เป็นรูป Sine ดังนั้นมอเตอร์จึงได้รับแรงดันฮาร์โมนิกส์ ซึ่งจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนใน air-gap ด้วยความเร็วที่สูงกว่าสนามแม่เหล็ก เนื่องจากความถี่ fundamental มาก ดังนั้นกระแสที่เกิดเนื่องมาจากฮาร์โมนิกส์ จะไม่ขึ้นกับสลีปของมอเตอร์ ทำให้กระแสเนื่องจากแรงดันฮาร์โมนิกส์ อาจมีค่ามากกว่ากระแสขององค์ประกอบมูลฐาน (fundamental component) เมื่อมอเตอร์มีโหลดน้อยๆ ทำให้กระแสของมอเตอร์ไม่ตกลงเท่าที่ควร เมื่อโหลดลดลงแรงดันฮาร์โมนิกส์ของอินเวอร์เตอร์จะทำให้เกิดการสูญเสียในมอเตอร์มากขึ้น ดังนั้นเราจำเป็นต้องนำมาพิจารณาในการเลือกขนาดของมอเตอร์ด้วย นอกจากนี้สนามแม่เหล็กที่เกิดจากแรงดันฮาร์โมนิกส์ อาจจะหมุนไปทางเดียวกันหรือสวนทางกับ fundamental air-gap flux จะทำให้เกิดทอร์คขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปจะถูกกรองออกไปเนื่องจากความเฉื่อย (inertia) ของระบบ แต่ถ้าความถี่ทอร์คที่เกิดขึ้น มีค่าใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์ (resonance) ของระบบเชิงกล อาจจะทำให้เกิด hunting อันจะเป็นผลเสียต่อระบบได้

2) การพิจารณาการเริ่มเดิน

สำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเราจะต้องให้ความสำคัญกับกระแสมอเตอร์ที่เกิดขึ้นขณะเริ่มเดินด้วย เพราะในขณะเริ่มเดินนั้นกระแสจะสูงมาก แต่เราสามารถขจัดปัญหาของกระแสที่สูงเกินนี้ได้ โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ของสมการที่ 2.2.23) เมื่อเรารักษาให้ ϕ_{ag} ให้คงที่ จะได้

$$I_r \approx K_{11} f s l \dots\dots\dots(2.2.28)$$

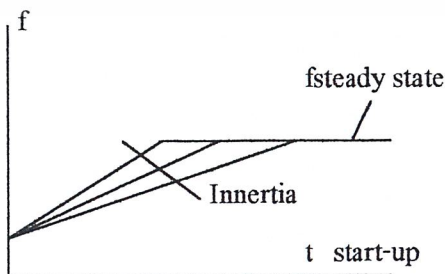


รูป 22 ความถี่ขณะเริ่มเดิน

จากรูปแสดงให้เห็นว่าเราสามารถเริ่มเดินมอเตอร์ได้อย่างไรที่ความถี่ค่า ๆ $f (= f_{start})$ ขณะเริ่มเดิน $f_{sl} = f_{start}$ ดังนั้น I_r จะถูกจำกัดได้โดยการเลือก f_{start} ที่เหมาะสม เมื่อ I_m คงที่ เนื่องจาก ϕ_{ag} คงที่ ดังนั้นกระแส สเตเตอร์ จะไม่สูงมากนักขณะเริ่มเดิน ความถี่เริ่มเดิน f_{start} สามารถดูได้จาก Nameplate สำหรับ f_{start} ที่ให้แรงบิดตามต้องการสามารถหาได้โดยพิจารณาจากรูปที่ 22) จะได้

$$f_{start} = f_{sl} \times T_{start} / T_{rate} \dots\dots\dots(2.2.29)$$

ในทางปฏิบัติแล้วความถี่ที่สเตเตอร์ f จะถูกทำให้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงค่าที่ตั้งไว้ ดังรูป 23) ซึ่งจะไม่มีการปล่อยให้กระแสที่สเตเตอร์ I_s เกินขีดจำกัดที่ระบุไว้เลยจนถึงความเร็วสุดท้ายที่ต้องการ โดยค่าที่ขีดจำกัดนี้จะลดลงถ้าโหลดมีค่าความเฉื่อยสูงเพื่อที่จะทำให้ความเร็วของมอเตอร์เพิ่มขึ้นได้ทัน



รูป 23 การเพิ่มขึ้นของความถี่ f ขณะเริ่มเดิน

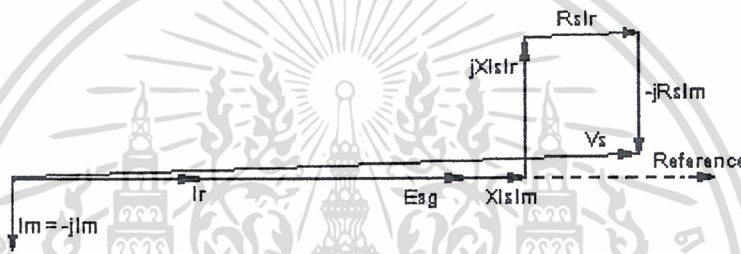
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) การเพิ่มแรงดันตามที่ต้องการ ณ การทำงานที่ความถี่ต่ำ
 ณ ที่ความถี่ต่ำ ๆ เราไม่สามารถที่จะละเลยผลของ R_s ได้ ถึงแม้ว่า f_{sl} จะมีค่าน้อยก็ตาม
 เพื่อที่จะให้มองเห็นภาพได้ชัดเจนยิ่งขึ้นให้เราสังเกตสมการต่อไปนี้

$$V_s = [E_{ag} + (2\pi f L_s)I_m + R_s I_r] + j[(2\pi f L_s)I_r - R_s I_m] \dots\dots\dots(2.2.30)$$

จากสมการที่ 2.2.30) นำมาเขียนเฟสเซอร์โคจรแอมป์ได้ดังรูปที่ 24) โดยเราจะเห็นว่าใน
 เทอมที่สองของสมการที่ 2.2.30) ด้านขวามือมีลักษณะของเฟสเซอร์ที่เกือบจะตั้งฉากกับ V_s ซึ่งทำ
 ให้มันมีผลกระทบต่อ V_s น้อยมาก ดังนั้น

$$V_s = E_{ag} + (2\pi f L_s)I_m + R_s I_r \dots\dots\dots(2.2.31a)$$



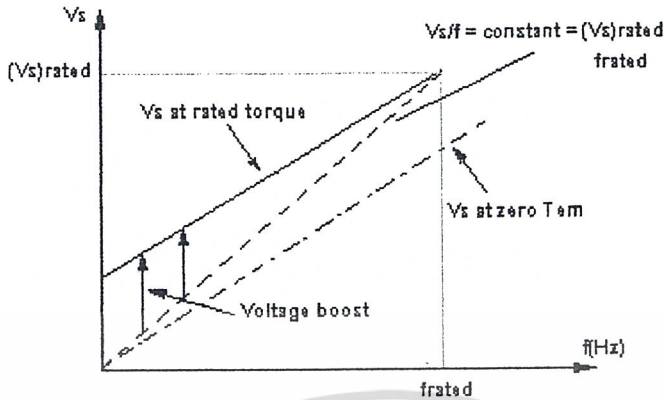
รูป 24 เฟสเซอร์โคจรแอมป์ที่ค่า f_{sl} มีค่าน้อย ๆ

ถ้าเรารักษาค่าของ ϕ_{ag} คงที่ , E_{ag} ก็จะแปรตาม f ในลักษณะลิเนียร์ และถ้า ϕ_{ag} คงที่
 ค่าของ I_m ก็จะคงที่ด้วย ดังนั้นแรงดันที่เพิ่มเข้าไปที่เกิดเนื่องจาก L_s ในสมการที่ 2.2.31a)
 สามารถเขียนได้ใหม่เป็นดังนี้คือ

$$V_s = K_{12}f + R_s I_r \dots\dots\dots(2.2.31b)$$

จากสมการที่ 2.2.31b) แสดงให้เห็นแรงดันที่เพิ่มเข้าไปเพื่อชดเชยแรงดันตกคร่อม R_s เพื่อ
 รักษาค่าของ ϕ_{ag} ให้คงที่นั้น ไม่ได้ขึ้นอยู่กับ f แต่ขึ้นอยู่กับ I_r ซึ่งจะแปรตาม T_{em} แรงดันที่ชั่ว
 V_s ที่ต้องรักษา ϕ_{ag} ให้คงที่ที่พิคตแรงบิดนั้น แสดงด้วยเส้นทึบในรูป 25) การที่จะรักษาค่าของ ϕ_{ag}
 ให้คงที่ได้นั้นเราจำเป็นต้องเพิ่มแรงดันขึ้น เพื่อให้มอเตอร์สามารถสร้างแรงบิด T_{em} ตามสม
 การ 2.2.31) และรูป 25) ได้ ในรูป 25) แสดงการรักษา ϕ_{ag} ให้คงที่ เราจะเห็นว่า %แรงดันที่เพิ่ม
 ขึ้นที่ความถี่ต่ำจะสูงมากกว่าที่ความถี่สูง (เพื่อชดเชยแรงดันตกคร่อม R_s) ที่ความถี่ f สูงๆ แรงดัน
 ที่ตกคร่อม R_s จะน้อยมากเมื่อเทียบกับ E_{ag} ดังนั้นการชดเชยแรงดันจึงมีน้อย แรงดันที่ต้องการที่
 สภาวะไว้ภาระแสดงเป็นเส้นปะในรูป 25)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



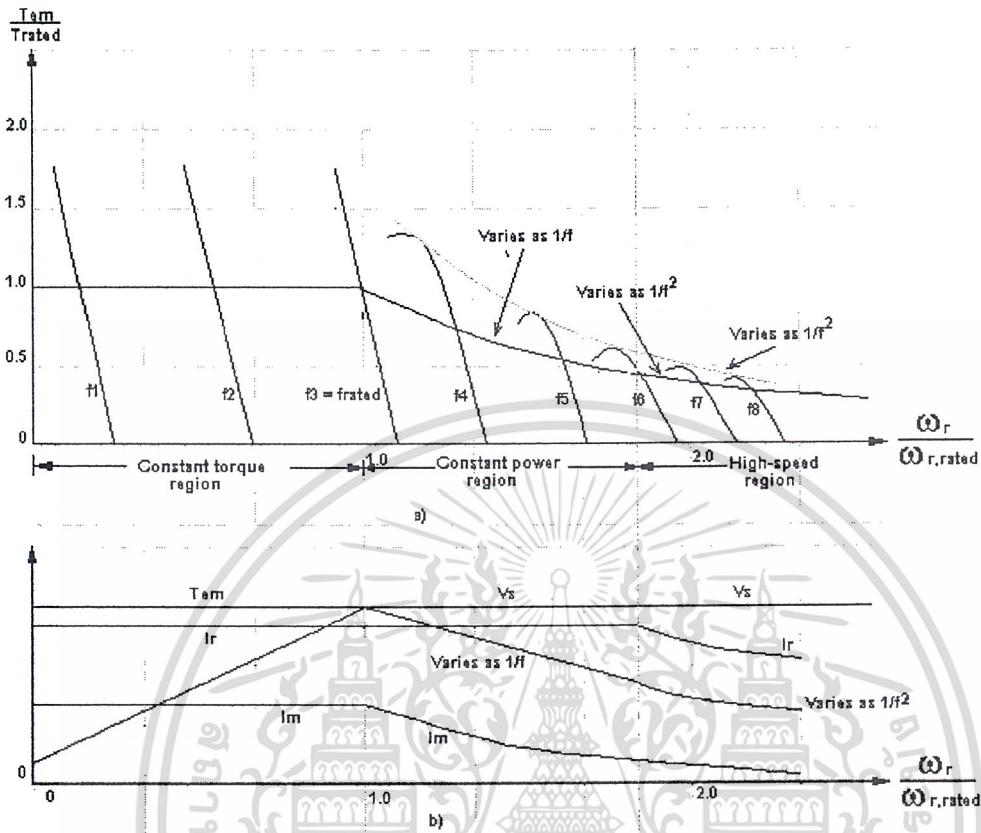
รูป 25 การเพิ่มระดับแรงดันเป็นที่ต้องการเพื่อรักษาฟลักซ์ในช่องอากาศให้คงที่

4) สมรรถนะของมอเตอร์ที่ความเร็วต่ำกว่าพิกัด

ความเร็วของมอเตอร์ที่ถูกควบคุมโดยการปรับความถี่ (และแรงดัน) จะทำให้สมรรถนะของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงไป ทั้งการทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าและสูงกว่าพิกัด สมรรถนะนี้เป็นสิ่งที่น่าสนใจอย่างยิ่ง เนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำส่วนใหญ่มีโครงสร้างที่แข็งแรง จึงทำให้มันสามารถปฏิบัติงานที่ความเร็วสูงเป็น 2 เท่าของความเร็วพิกัดได้โดยไม่มีปัญหาทางกลเกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตามแรงบิดและกำลังงานซึ่งเป็นฟังก์ชันของความเร็วโรเตอร์ เป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาให้ละเอียดและชัดเจน

คุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็วที่แสดงในรูป 26a) ในรูป 26b) ค่าของ V_s , I_r , I_m และ T_{em} ถูกพล็อตให้เป็นฟังก์ชันของความเร็วโรเตอร์ ส่วนในรูป 26c) ได้พล็อตค่าของ f_{sl} และ S ไว้ควรมีหมายเหตุไว้ว่าในมอเตอร์ขนาดใหญ่ ๆ ค่าของ $I_s \approx I_r$ เนื่องจาก I_m มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ I_s ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าพิกัดเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 26 คุณลักษณะและสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

5) การทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าพิกัด : ช่วงแรงบิดคงที่

ในช่วงที่ความเร็วของมอเตอร์ต่ำกว่าพิกัด เส้นโค้งที่บในรูป 26a) แสดงคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วของมอเตอร์ที่ค่า fsl ต่ำ ๆ และ ϕ_{ag} คงที่โดยการควบคุม V_s/f ในรูป 26b) เราจะเห็นว่าขนาดของแรงดันที่สเตเตอร์จะลดลงในลักษณะลิเนียร์ตามความถี่ โดยเริ่มต้นจากค่าที่พิกัดของมอเตอร์และลดลงมาจนถึงค่าต่ำที่สุดที่ตั้งไว้ ถ้า ϕ_{ag} ถูกรักษาให้คงที่แล้ว มอเตอร์สามารถที่จะจ่ายแรงบิดที่พิกัดได้ (อย่างต่อเนื่อง) โดยรับกระแสที่พิกัดเข้ามาและค่า fsl มีค่าคงที่ ดังแสดงไว้ในรูป 26) ดังนั้นในช่วงนี้ (ความเร็วต่ำกว่าพิกัด) เราเรียกว่าช่วงที่มีแรงบิดคงที่ (Constant Torque Region) ในช่วงนี้ fsl จะถูกรักษาให้คงที่เท่ากับค่าซึ่งเกิดขึ้นขณะที่มอเตอร์ทำงานเต็มพิกัด

ณ ช่วงที่แรงบิดคงที่เท่าพิกัดนั้น กำลังงานสูญเสีย $P_r = 3R_r I_r^2$ (เนื่องจากค่าความต้านทานของโรเตอร์) จะมีค่าคงที่ด้วย นั่นก็หมายความว่าค่าของกระแสโรเตอร์ I_r มีค่าคงที่เช่นกัน แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติแล้ว การทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าพิกัดนั้นจะเกิดปัญหาในเรื่องของการระบายความร้อนขึ้น (ความร้อนที่เกิดจากกำลังสูญเสียที่โรเตอร์) เนื่องจากความสามารถในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้เพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบายความร้อนของมอเตอร์กลดลงนั่นเอง นอกเสียจากว่ามอเตอร์นั้นจะมีพัดลมซึ่งใช้ในการระบายความร้อนมีความเร็วคงที่ หรือมอเตอร์นั้นถูกออกแบบให้มีลักษณะที่ปิดหมุดและไม่มีการระบาย (มอเตอร์ที่ระบายความร้อนผ่าน โครงเพียงอย่างเดียว) มิฉะนั้นแล้วสมรรถนะของแรงบิดจะลดลง และควรจะมีหมายเหตุไว้ว่าปรากฏการณ์ที่แรงบิดคงที่นี้จะไม่รวมโหลดประเภทแรงเหวี่ยงไว้ด้วย เนื่องจากโหลดประเภทนี้ต้องการแรงบิดต่ำที่ความเร็วต่ำ ๆ

2.2.4 การอินเวอร์เตอร์

ประเภทของการอินเวอร์เตอร์แบ่งกว้างได้ 2 ประเภทคือ

- 1.) การอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว
- 2.) การอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

นอกจากนี้การอินเวอร์เตอร์ยังแบ่งออกตามลักษณะโครงสร้าง และการนำไปใช้งานได้ 2 ประเภท คือ

1.) การอินเวอร์เตอร์แบบการป้อนแรงดัน (Voltage Source Inverter ; VSI) ซึ่งแบ่งได้เป็น 4 กลุ่มดังนี้

- 1.1) อินเวอร์เตอร์แบบการมอดูเลตตามความกว้างของพัลส์ [Pulse Width Modulation (PWM) Inverter]
- 1.2) อินเวอร์เตอร์แบบเรโซแนนซ์
- 1.3) อินเวอร์เตอร์แบบ McMurray
- 1.4) อินเวอร์เตอร์แบบ McMurray-Bedford

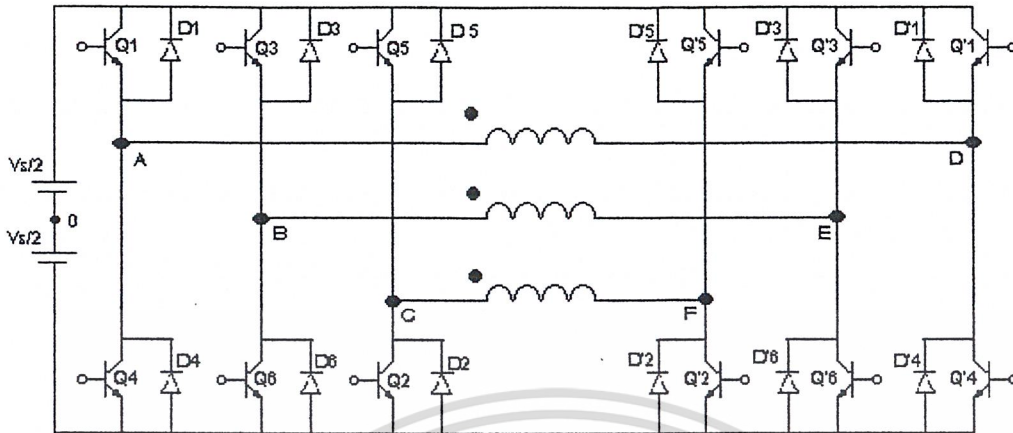
2.) การอินเวอร์เตอร์แบบการป้อนกระแส (Current Source Inverter ; CSI)

สำหรับในที่นี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะการอินเวอร์เตอร์แบบ Pulse Width Modulation VSI เท่านั้น

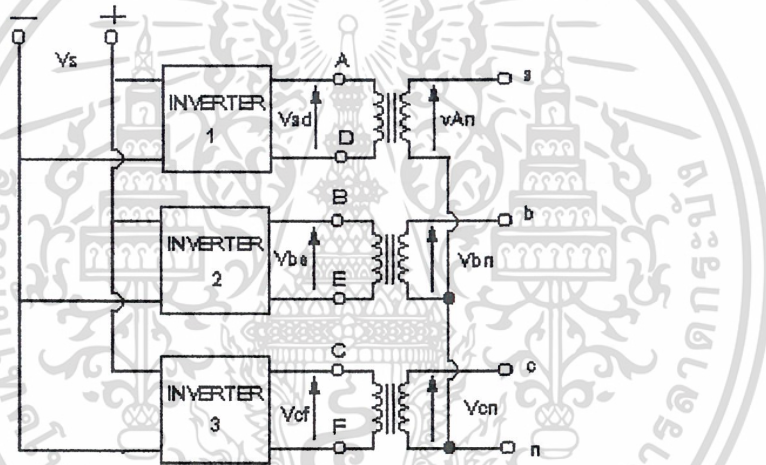
- หลักการทำงานการอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

เรานำหลักการการอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวมาใช้พิจารณากับการอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ดังรูป 27)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 27a) การอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

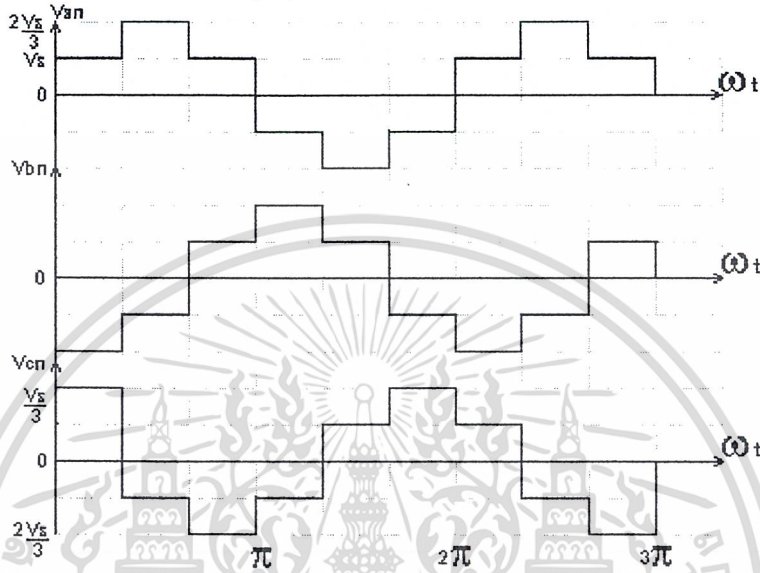
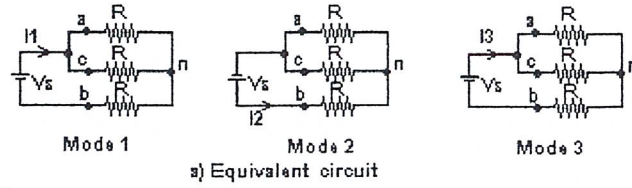


รูป 27b) การต่อขดลวดทุกขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้าเข้าอินเวอร์เตอร์

สำหรับอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ที่ใช้เพื่ออธิบายหลักการทำงานประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์จำนวน 3 ตัว ซึ่งสร้างขึ้นจากทรานซิสเตอร์ 6 ตัว และไดโอด 6 ตัว ดังรูปที่ 27a)

จากรูป 27a) การทำงานแต่ละไซเคิลจะแบ่งออกเป็น 6 โหมด แต่ละโหมดโดยมีช่วง 60 องศา ดังนั้นการทำงานในแต่ละครั้งไซเคิลจึงแบ่งเป็น 3 โหมด ซึ่งเขียนวงจรเทียบเคียงได้ดังรูป 28a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 28 แสดงโหมดการทำงานของอินเวอร์เตอร์

ช่วงโหมดที่ 1 $0 \leq \omega t < \pi/3$

$$R_{eq} = R + R/2 = 3R/2$$

$$i_1 = V_s / R_{eq} = 2V_s / 3R$$

$$V_{an} = V_{cn} = i_1 R / 2 = V_s / 3$$

$$V_{bn} = -i_1 R = -2V_s / 3$$

ช่วงโหมดที่ 2 $\pi/3 \leq \omega t < 2\pi/3$

$$R_{eq} = R + R/2 = 3R/2$$

$$i_2 = V_s / R_{eq} = 2V_s / 3R$$

$$V_{an} = i_2 R = 2V_s / 3$$

$$V_{bn} = V_{cn} = -i_2 R / 2 = -V_s / 3$$

ช่วงโหมดที่ 3 $2\pi/3 \leq \omega t < \pi$

$$R_{eq} = R + R/2 = 3R/2$$

$$i_3 = V_s / R_{eq} = 2V_s / 3R$$

$$V_{an} = V_{bn} = V_{cn} = -i_3 R = -2V_s / 3$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

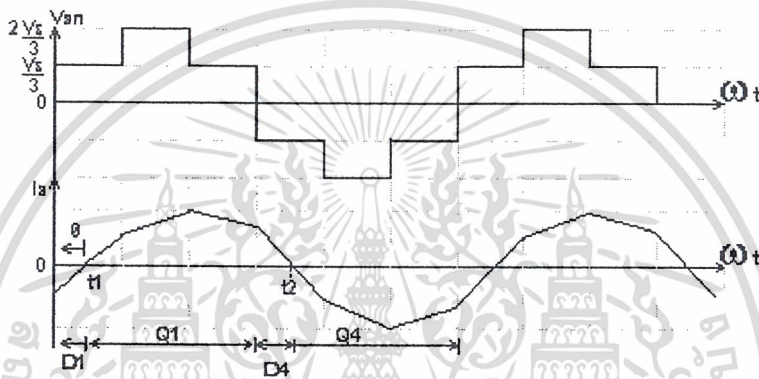
หาค่า rms ของแรงดันที่สายได้จาก

$$V_L = 0.8165V_s \quad \dots\dots\dots(2.2.32a)$$

หาค่า rms ของแรงดันที่เฟสได้จาก

$$V_p = 0.4714V_s \quad \dots\dots\dots(2.2.33b)$$

กรณีวงจรในรูป 27a) ต่อกับโหลดอินดักทีฟ กระแสที่โหลดจะล้าหลังแรงดันไฟฟ้าเป็นมุม θ ดังรูป 30) หรืออีกนัยหนึ่ง การนำกระแสของทรานซิสเตอร์ (หรือไทรสเตอร์) และไดโอดขึ้นอยู่กับ Power Factor ของโหลด ด้วย



รูป 29 แสดงสัญญาณเอาต์พุตที่ได้

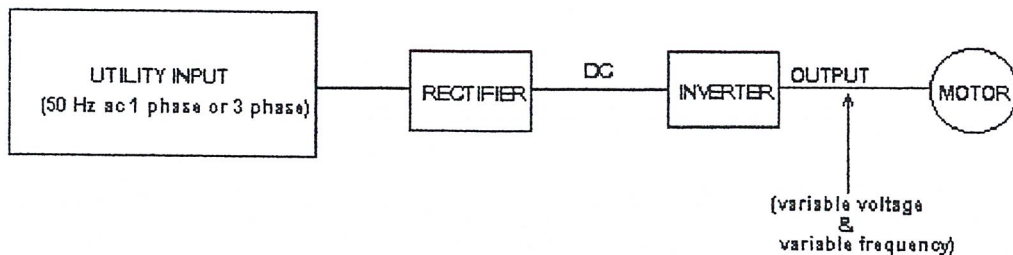
ขณะทรานซิสเตอร์ Q4 (ในรูป 27a) ปิด กระแสที่จ่าย $-i_u$ จะไหลผ่าน D1 ซึ่งทำให้ขั้ว โหลด a ต่อกับแหล่งจ่ายดีซี (โดยผ่าน D1) จนกระทั่ง กระแสที่โหลดกลับขั้วที่เวลา $t = t_1$ คือที่ ช่วงเวลา $0 \leq t \leq t_1$ ทรานซิสเตอร์จะไม่นำกระแส ส่วน Q4 จะเริ่มนำกระแสที่เวลา $t = t_1$

2.2.5 อินเวอร์เตอร์เพื่อการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ

อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในงานการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะต้องสามารถเปลี่ยนแปลงแรงดันและความถี่ได้ ซึ่งจะทำหน้าที่เชื่อมโยงระหว่างระบบจ่ายไฟและมอเตอร์ ดังนั้นอินเวอร์เตอร์ที่ดีต้องมีคุณสมบัติพื้นฐานที่สอดคล้องกับความต้องการของมอเตอร์ดังต่อไปนี้

1. สามารถที่จะปรับความถี่ได้ เป็นสัดส่วนกับความเร็วยุโรปที่ต้องการ
2. สามารถปรับแรงดันเอาต์พุตเพื่อรักษาอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ v/f ให้คงที่ตลอดช่วงแรงบิดคงที่ตามต้องการ
3. สามารถจ่ายกระแสได้เต็มพิกัดที่ความถี่ใด ๆ ซึ่งอยู่ในช่วงทอร์คคงที่ที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 30 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบอินเวอร์เตอร์เพื่อการขับนำมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในรูป 30 แสดงหลักการพื้นฐานซึ่งแหล่งจ่ายไฟเข้าเอซี จะถูกเปลี่ยนเป็นแรงดันดีซีโดยใช้เรกติไฟเออร์ที่สามารถควบคุมแรงดันได้หรือควบคุมไม่ได้ก็ได้ และอินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันไฟดีซีให้เป็นเอซี ที่สามารถเปลี่ยนแรงดันและความถี่ได้ ในที่นี้จะขอกกล่าวถึงอินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดัน : VSI

- Voltage Source Inverter : VSI

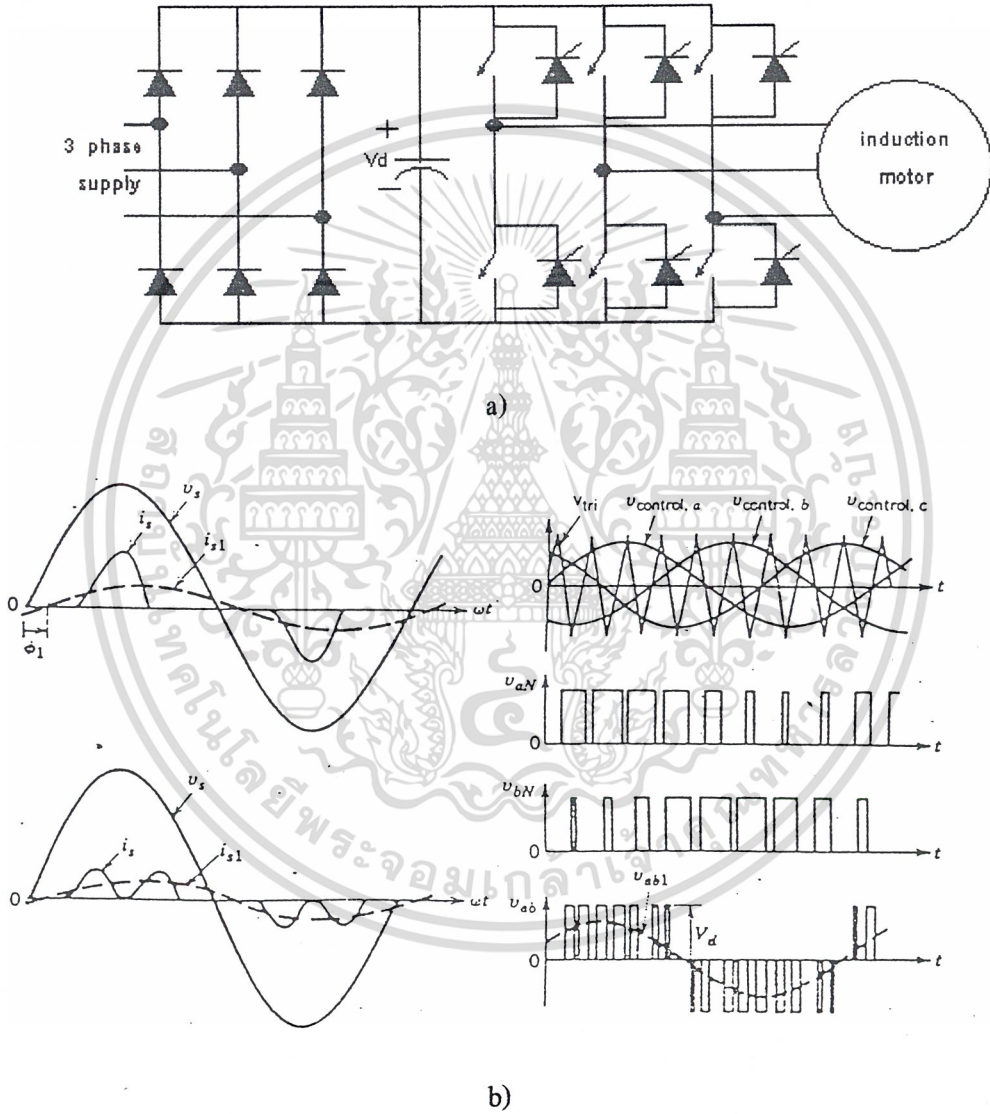
โครงสร้างแรงดันดีซีถึงคัมมีขนาด filter capacitor C ที่มีค่ามาก อาจกล่าวได้ว่าแรงดันอินพุตของอินเวอร์เตอร์มีค่าคงที่ ทำให้แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์มีค่าคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับโหลด และโดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดด้วยกันคือ 6-Step อินเวอร์เตอร์ และ PWM อินเวอร์เตอร์ ข้อดีของโวลท์เตจซอร์สอินเวอร์เตอร์สามารถควบคุมแรงดันและความถี่ได้ง่ายและความถี่ได้ในช่วงกว้างและใช้ได้กับมอเตอร์หลาย ๆ ตัวที่ทำงานพร้อม ๆ กัน ส่วนข้อเสียมักมีปัญหาในเรื่องลัดวงจร(short through) ของอุปกรณ์สวิทซ์ซึ่งภายในกึ่งเดียวกันของอินเวอร์เตอร์ ในทางปฏิบัติใช้วงจรลอคเอาท์ที่มีการสร้างเคคไทม์เป็นส่วนช่วยในการป้องกัน

- การขับเคลื่อนโดยใช้ PWM-VSI อินเวอร์เตอร์ซึ่งสามารถปรับความถี่ได้

ในรูป 32a)แสดงโครงสร้างของตัวขับเคลื่อนที่ใช้ PWM-VSI โดยที่อินพุตเป็นแหล่งจ่าย 3 เฟส โดย PWM-VSI สามารถปรับขนาดของแรงดันและความถี่ที่เอาต์พุตได้ โดยปกติแล้วอินพุตของอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้จะให้ Diode Rectifier เป็นตัวเปลี่ยนแรงดันไฟสลับให้เป็นไฟตรง วิธีการหนึ่งที่ใช้ในการสร้างสัญญาณควบคุมอุปกรณ์ที่ใช้เป็นสวิทซ์ของอินเวอร์เตอร์ คือ การนำแรงดัน 3 เฟส ซึ่งมีลักษณะเป็นไซน์ (เป็นแรงดันควบคุม Control Voltage ซึ่งมีความถี่เท่ากับเท่ากับความถี่ของเอาต์พุตที่ต้องการ และมีสัดส่วนของขนาดที่พอดีกับขนาดของแรงดันเอาต์พุต) ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีความถี่เท่ากับความถี่ของการสวิทซ์ซึ่งที่เลือกไว้ (ขึ้นอยู่กับ Specification ของอุปกรณ์) ดังแสดงในรูป 32b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากที่เคยกล่าวมาข้างต้นแล้วว่าแรงดันเอาต์พุตของ PWM-Inverter จะมีองค์ประกอบของฮาร์โมนิกส์ประกอบขึ้นมาตาม Sideband ของความถี่ที่ใช้ในการสวิตชิงและความถี่สวิตชิงคูณด้วยค่าจำนวนเต็ม (กล่าวคือ ตำแหน่งของฮาร์โมนิกส์จะอยู่ที่ $n \times f$ เมื่อ $n = 1,2,3,4,\dots$ และ f คือความถี่ในการสวิตชิง) ดังนั้นถ้าเราใช้ความถี่ในการสวิตชิงสูง ๆ จะทำให้กระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์มีลักษณะที่เป็น ไรซ์ (บวกกับ ripple เล็กน้อยที่ฮาร์โมนิกส์สูง ๆ)



รูป 31 PWM-VSI : a) โครงสร้าง b)รูปคลื่นสัญญาณ

เมื่อกระแสกระเพื่อม (Ripple Current) ไหลผ่าน DC Bus Capacitor (มีความถี่เท่ากับความถี่ในการสวิตชิง) จะทำให้อินเวอร์เตอร์มองเห็น Impedance ภายในของแหล่งจ่ายอินพุตไฟตรง (อิมพีแดนซ์ของ Capacitor) และค่าของอิมพีแดนซ์นี้จะน้อยลงถ้าความถี่ในการสวิตชิงมากขึ้น (ให้พิจารณาที่ $X_c = 1/2 \pi fC$) ดังนั้นขนาดของ Capacitor ที่ใช้ใน PWM-VSI ไม่จำเป็นต้องมี

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดใหญ่ (เนื่องจากความถี่สูง) นั่นก็คือค่า Capacitance น้อย ๆ ก็เพียงพอแล้ว แต่อย่างไรก็ตาม Capacitor ที่ใช้นี้จะต้องสามารถรองรับกระแสกระเพื่อมได้ และค่า Capacitance ที่น้อย ๆ นี้สามารถทำให้รูปคลื่นกระแสที่จ่ายเข้าระบบกำลังมีลักษณะที่ดีได้ แต่ยังมีสิ่งหนึ่งที่ต้องระวังคือ เมื่อใช้ Capacitor ที่มีค่าน้อย ๆ แล้ว แรงดันกระเพื่อมของ DC Bus Voltage ต้องไม่สูงมากเกินไปนัก เพราะจะทำให้เกิดฮาร์โมนิกส์ขึ้นที่แรงดันที่จะจ่ายให้กับมอเตอร์ได้

- ผลกระทบที่เกิดจากฮาร์โมนิกส์ที่มีต่อ PWM-VSI

แรงดันเอาต์พุตของ PWM-Inverter จะประกอบด้วยฮาร์โมนิกส์ที่มีอันดับสูงมาก ๆ ตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ดังนั้นการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์จะน้อยมาก เนื่องจากว่าที่ความถี่เหล่านี้ ค่าของ รีแอกแตนซ์รีวัตต์ไหลของมอเตอร์จะมีค่าสูงมาก (กระแสที่มีความถี่สูง ๆ ไหลผ่านไม่ได้) เนื่องจากขนาดของแรงดันที่ฮาร์โมนิกส์เหล่านี้มีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับแรงดันที่ความถี่มูลฐาน ดังนั้นค่าสูญเสียในแกนเหล็ก (เนื่องจากกระแสไหลวนและกระแสฮิสเตอร์รีซีตในแกนเหล็กของโรเตอร์และสเตเตอร์) จะมีค่ามากขึ้น ในความเป็นจริงแล้วค่าสูญเสียที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลฮาร์โมนิกส์ของ PWM-Inverter จะสูงกว่าที่เกิดใน Square-Wave Inverter การเปรียบเทียบนี้ได้คำนึงถึง Class ของมอเตอร์ คุณสมบัติของวัสดุแม่เหล็กและความถี่ในการสวิทช์ด้วย ตามปกติแล้วในมอเตอร์มาตรฐานค่าสูญเสียที่เพิ่มขึ้นมาเนื่องจากฮาร์โมนิกส์นี้จะอยู่ที่ประมาณ 5-10% ของพิกัดที่ใช้ (ตัวประกอบกำลัง Power Factor) ทางด้านอินพุตและรูปคลื่นของกระแส

กระแสสลับทางด้านอินพุตที่จ่ายให้กับ Rectifier ของตัวขับเคลื่อนที่ใช้ PWM-VSI จะประกอบด้วยฮาร์โมนิกส์จำนวนมาก ลักษณะรูปคลื่นของกระแสอินพุตนี้ได้แสดงไว้ในรูป 32b) (ทั้งอินพุตที่เป็นหนึ่งเฟสและสามเฟส) ค่าความเหนี่ยวนำทางด้านอินพุต L_s จะช่วยปรับปรุงรูปคลื่นของกระแสสลับทางด้านอินพุตให้ดีขึ้นบ้างบางส่วน และการใช้ DC-Link ที่มีค่า Capacitance ค่า ๆ ก็จะช่วยทำให้รูปคลื่นของกระแสอินพุตดีขึ้นได้

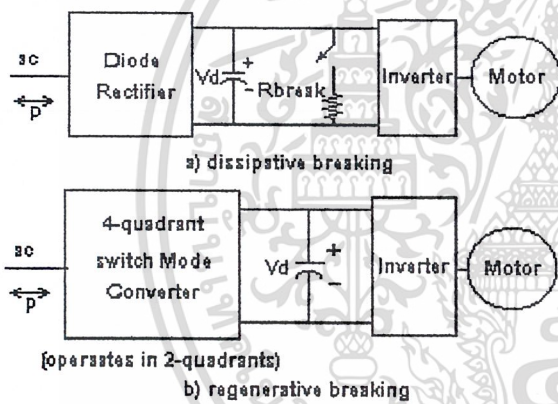
ตัวประกอบกำลังทางด้านอินพุตไฟสลับ ซึ่งเกิดจากการใช้งานตัวขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้น ไม่ได้ขึ้นอยู่กับตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ และความเร็วในการทำงานของตัวขับเคลื่อนเลย แต่มันขึ้นอยู่กับกำลังงานของโหลด (แต่ขึ้นอยู่กับเพียงเล็กน้อย) และเราสามารถปรับปรุงตัวประกอบกำลังได้เพียงเล็กน้อยถ้ากำลังงานของโหลดมีค่าสูงมากขึ้น ค่าตัวประกอบกำลังการเลื่อน (Displacement Power Factor; DPF) มีค่าประมาณ 100% โดยสังเกตได้จากลักษณะรูปคลื่นของกระแสอินพุตในรูป 32b)

- การเบรคด้วยวิธีทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Breaking)

ในช่วงการเบรคด้วยวิธีการทางแม่เหล็กไฟฟ้านั้นจะมีกำลังงานไฟฟ้าส่วนหนึ่งไหลย้อนกลับจากมอเตอร์เข้าสู่ตัวควบคุมความถี่ โดยที่ในระหว่างการเบรคนั้นชั่วขณะของแรงดันที่ตกคร่อมไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DC Bus Capacitor จะเหมือนกับในตอนที่มีมอเตอร์ทำงานปกติ ดังนั้นทิศทางการไหลของกระแสผ่าน DC Bus เข้าสู่อินเวอร์เตอร์จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางการไหลปกติ (เพราะในช่วงนี้มอเตอร์จะกลายเป็นเครื่องกำเนิด) ใน PWM-VSI จะมีการใช้ Diode Rectifier ในการแปลงแรงดันไฟฟ้าให้เป็นแรงดันไฟตรง ซึ่งเรารู้ว่ากระแสที่ไหลผ่านไดโอดนั้นจะไหลในทิศทางเดียวเท่านั้น ดังนั้นในช่วงการเบรก กระแสที่ไหลสวนกลับนั้นจะไม่สามารถไหลผ่านชุดไดโอดเรกติไฟเออร์ได้ ฉะนั้นเราจึงจำเป็นต้องมีกลไกหรือวิธีการบางอย่างเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นจากพลังงานที่เกิดขึ้นในช่วงนี้ (เนื่องจากแรงดันที่ DC-Bus อาจจะมีค่าสูงเกินกว่าที่กำหนดได้)

วิธีการหนึ่งที่สามารถใช้ในการป้องกันเหตุการณ์ที่อาจจะเกิดขึ้นจากที่ได้กล่าวมาข้างต้นได้ ก็คือการต่อตัวต้านทานอนุกรมกับสวิตช์ตัวหนึ่ง แล้วนำไปต่อขนานกับ DC Bus Capacitor ดังแสดงในรูป 32a) โดยถ้าแรงดันที่ตกคร่อม Capacitor มีค่าสูงเกินกว่าที่กำหนดไว้ เราจะต้องทำการสับสวิตช์ลงเพื่อให้ความต้านทานดูดซับพลังงานที่เกิดจากการเบรกนี้ไว้



รูป 32 การเบรกด้วยวิธีการทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ใน PWM-VSI

ยังมีเทคนิคที่มีประสิทธิภาพอีกอย่างหนึ่งที่ใช้ในการเบรก ก็คือการใช้ Four-Quadrant Converter (Switching-Mode หรือคือ Thyristor Converter แบบ Back-to-Back) ต่อทางด้านหน้าชุด Diode Rectifier โดย Converter ตัวนี้จะยอมให้พลังงานที่เกิดจากความเฉื่อยของมอเตอร์และไหลกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายไฟได้ ดังแสดงไว้ในรูป 32b) เราเรียกการเบรกชนิดนี้ว่า Regenerative Braking เพราะว่าพลังงานที่เกิดขึ้นนี้ไม่ได้สูญเสียไปไหน แต่ได้ป้อนคืนกลับสู่ระบบไฟฟ้าแทนซึ่งทำให้เกิดการประหยัดพลังงาน ในการตัดสินใจว่าจะใช้ Regenerative Braking นั้นจะต้องพิจารณาว่าราคาของอุปกรณ์ที่จะต่อเพิ่มเข้าไบนั้นมันคุ้มค่ากับพลังงานที่จะประหยัดหรือไม่ รวมทั้งว่าเราต้องการกระแสรูปไซน์และ Unity Power Factor ในระบบหรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

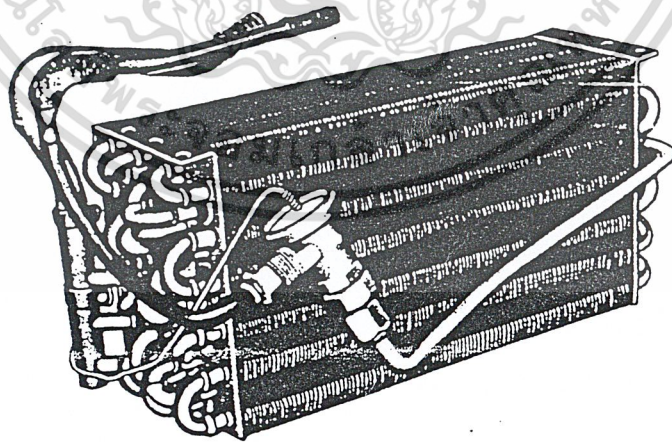
2.3 ระบบเครื่องปรับอากาศในรถยนต์

ทุกวันนี้เครื่องปรับอากาศรถยนต์นับว่าเป็นสิ่งจำเป็นในการเดินทาง โดยรถยนต์ที่ปรับอากาศช่วยให้ประสิทธิภาพในการทำงานของคนดีขึ้นเพราะไม่ต้องหงุดหงิดและอารมณ์เสียในขณะที่รถติด ซึ่งระบบของเครื่องปรับอากาศรถยนต์นั้นถูกประกอบด้วยชิ้นส่วนอุปกรณ์หลายอย่าง โดยอุปกรณ์เหล่านี้ทำหน้าที่ในการถ่ายเทความร้อนเพื่อดึงเอาความร้อนออกจากภายในรถและส่งถ่ายความร้อนนี้ออกไปทิ้งนอกรถ และทำให้อากาศภายในรถมีการหมุนเวียนเพื่อให้มีการปรับระดับความสบายของผู้โดยสาร โดยในส่วนของเครื่องปรับอากาศในรถไฟฟ้ามันแตกต่างจากรถยนต์ทั่วไปคือ ในรถยนต์ทั่วไปใช้เครื่องยนต์เป็นตัวขับเคลื่อนคอมเพรสเซอร์ แต่ในรถไฟฟ้าจะใช้มอเตอร์อินดักชันเป็นระบบขับเคลื่อน จึงทำให้ต้องใช้เครื่องยนต์นอกประตักเข้าไปเพื่อช่วยในการขับเคลื่อนคอมเพรสเซอร์แทนเครื่องยนต์ของรถยนต์ทั่วไป

อุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในระบบเครื่องปรับอากาศในรถยนต์ มีดังนี้

2.3.1) FRONT แบบแชนที่มีมอเตอร์ในตัวหรือหน่วยทำความเย็น(อีวาพอเรเตอร์)

อีวาพอเรเตอร์(Evaporator) คือ อุปกรณ์ในระบบทำความเย็น ซึ่งจะทำให้สารทำความเย็นขยายตัวกลายเป็นไอทำให้เกิดความเย็น อีวาพอเรเตอร์เป็นส่วนที่ทำความเย็นของระบบซึ่งแสดงได้ดังรูป 33

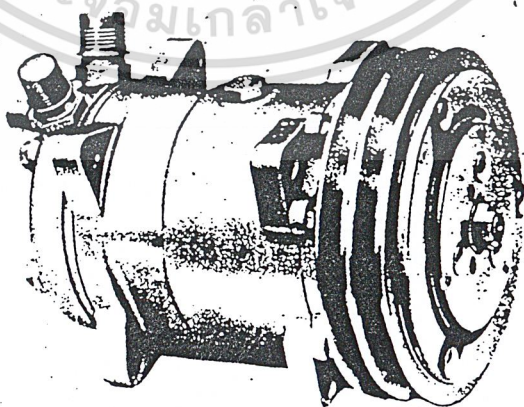


รูป 33 อีวาพอเรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อีวาพอเรเตอร์ประกอบด้วยขดท่อทองแดงหรืออะลูมิเนียม และมีครีบบอะลูมิเนียมเป็นตัวช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อน เหตุผลที่ใช้ท่อทองแดงหรืออะลูมิเนียมเป็นท่อทางเดินน้ำยา ก็เพราะเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำความร้อนได้ดี ขณะที่น้ำยาไหลผ่านท่อทางเดิน น้ำยาในอีวาพอเรเตอร์ระเหยตัวดูดซับปริมาณความร้อนจากอากาศโดยรอบและอีวาพอเรเตอร์นี้จะอยู่ภายในโครงซึ่งมีมอเตอร์โบลเวอร์ทำหน้าที่เป่าอากาศผ่านครีบบของอีวาพอเรเตอร์ และผิวของท่อทางเดินน้ำยาถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำยาภายในอีวาพอเรเตอร์ซึ่งกำลังระเหยตัวดูดซับปริมาณความร้อนอยู่ ทำให้อุณหภูมิของอากาศที่ถูกเป่าผ่านออกมามีอุณหภูมิต่ำลงและเป่าเข้าไปภายในรถโดยตรง และอีวาพอเรเตอร์ยังประกอบไปด้วยถาดรองน้ำที่อยู่อีกข้างของอีวาพอเรเตอร์ ความชื้นของอากาศภายในรถจะถูกกลั่นตัวเป็นหยดน้ำขณะอากาศถูกดูดเป่าผ่านอีวาพอเรเตอร์ น้ำนี้จะหยดลงในถาดรองข้างใต้ซึ่งมีสายท่อเติมน้ำที่เจาะลงใต้ห้องรถปล่อยน้ำนี้ทิ้งลงบนถนนอีกที่หนึ่ง

2.3.2) คอมเพรสเซอร์ (COMPRESSOR) คือ อุปกรณ์ที่เพิ่มความดันของสารทำความเย็นที่อยู่ในสถานะที่เป็นไอ ซึ่งจะทำหน้าที่ในการดูดและอัดน้ำยาในสถานะที่เป็นแก๊ส คือดูดน้ำยาที่เป็นซูเปอร์ฮีตแก๊สความดันต่ำและอุณหภูมิต่ำจากอีวาพอเรเตอร์ผ่านเข้ามาทางท่อซักชั่น (suction) ของคอมเพรสเซอร์ แล้วอัดแก๊สนี้ให้มีความดันสูงและมีอุณหภูมิสูงขึ้นด้วยส่งเข้ายังคอมเพรสเซอร์ โดยผ่านเข้าทางท่อดิสชาร์จ (discharge) เพื่อไปกลั่นตัวเป็นของเหลวในคอนเดนเซอร์ ด้วยการระบายความร้อนออกจากน้ำยาอีกที่หนึ่ง คอมเพรสเซอร์ที่ใช้ในเครื่องปรับอากาศรถยนต์ได้แก่ คอมเพรสเซอร์แบบสวอชเพลต ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางเพราะคอมเพรสเซอร์แบบนี้มีขนาดเล็กกระทัดรัดมีประสิทธิภาพในการทำงานสูงและจุดแรงเครื่องยนต์น้อยกว่าในขนาดของการทำความเย็นจำนวนบีที่เทียบเท่ากันเมื่อเทียบกับคอมเพรสเซอร์แบบอื่น



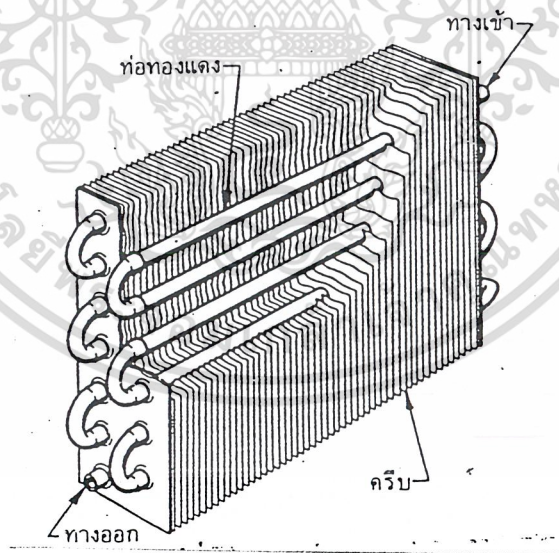
รูป 34 คอมเพรสเซอร์แบบสวอชเพลต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของคอมเพรสเซอร์แบบสวอชเพลตนี้ประกอบด้วยกระบอกสูบ 5 กระบอกสูบ มีสวอชเพลตเป็นเพลตเอียงหมุนกวาดลูกสูบทั้ง 5 ทำหน้าที่ในการดูดน้ำยาในสถานะแก๊ส การเคลื่อนที่ของลูกสูบเพื่อดูดอัดน้ำยาของคอมเพรสเซอร์แบบนี้ไม่ต้องมีเพลตข้อเหวี่ยงเป็นตัวช่วยให้ลูกสูบเคลื่อนที่ในกระบอกสูบ แต่จะใช้เพลตเอียงทำหน้าที่แทน ในขณะที่แกนเพลตของคอมเพรสเซอร์หมุน เพลตเอียงจะหมุนตามไปด้วยซึ่งมีให้ลูกสูบเคลื่อนที่กลับไปกลับมาภายในกระบอกสูบเกิดการดูดและอัดน้ำยา

2.3.3) คอนเดนเซอร์(CONDENSER) คืออุปกรณ์ที่ทำให้สารทำความเย็นในสภาพที่เป็นไอเปลี่ยนสภาพเป็นของเหลวโดยการระบายความร้อนออกจากสารทำความเย็น น้ำยาหรือสารทำความเย็นในสถานะที่ไอนี้มีความดันสูง อุณหภูมิสูง ซึ่งถูกอัดส่งมาจากคอมเพรสเซอร์ เมื่อถูกระบายความร้อนออกจะกลั่นตัวเป็นน้ำยาเหลวภายในคอนเดนเซอร์ แต่จะมีความดันและอุณหภูมิสูงอยู่

คอนเดนเซอร์ประกอบด้วยชุดท่อทองแดงหรืออะลูมิเนียมและมีครีบบ (fins) เป็นตัวช่วยเพิ่มที่ผิวในการถ่ายเทความร้อนโดยอากาศซึ่งผ่านเข้ามาบนผิวหน้าของคอนเดนเซอร์ อากาศที่ผ่านคอนเดนเซอร์นี้เป็นอากาศที่ปะทะเข้ามาทางด้านหน้ารถ และสวนทางกลับทิศทางการเคลื่อนที่ของรถหรืออาจเป็นอากาศที่ได้จากพัดลมหรือใบพัดโบลเวอร์



รูป 35 คอนเดนเซอร์

เนื่องจากคอนเดนเซอร์ติดตั้งอยู่ทางด้านหน้าสุดก่อนหม้อน้ำรถยนต์ ฉะนั้นขณะที่รถวิ่งจึงเป็นส่วนที่ปะทะกับอากาศก่อนและมักจะมีแมลง ผื่นหรือสิ่งสกปรกอื่นๆ อุดตันที่ครีบบของคอนเดนเซอร์ ถ้าเกิดการอุดตันเช่นนี้แล้วจะทำให้การระบายความร้อนออกของน้ำยาไม่ดีเท่าที่ควร ทำให้ความดันในระบบด้านความดันสูงจะสูงเกินเกณฑ์และเครื่องยนต์ต้องทำงานหนักในขณะเดียวกันเครื่องไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยนต์จะเกิดการร้อนจัด การทำความสะอาดภายนอกของคอนเดนเซอร์ทำได้โดยการใช้น้ำเย็นล้างหรือฉีดและใช้แปรงถูเอาฝุ่นหรือแมลงออกจากครีบของคอนเดนเซอร์ ถ้าพบว่าเกิดการรั่วที่คอนเดนเซอร์(ข้อต่อทางด้านเข้า-ทางออกของน้ำยา) ให้ขันข้อต่อต่างๆให้แน่น แต่ถ้าเกิดแตกหรือรั่วที่ท่อทางด้านเข้า-ออกของคอนเดนเซอร์และไม่สามารถซ่อมได้ ให้ทำการถอดเปลี่ยนใหม่ โปรดจำไว้ว่าคอนเดนเซอร์ควรทนความดันได้ถึง 400 ถึง 500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว(psi) ตามปกติแล้วขณะระบบทำงานความดันภายในคอนเดนเซอร์จะอยู่ระหว่าง 150 ถึง 300 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

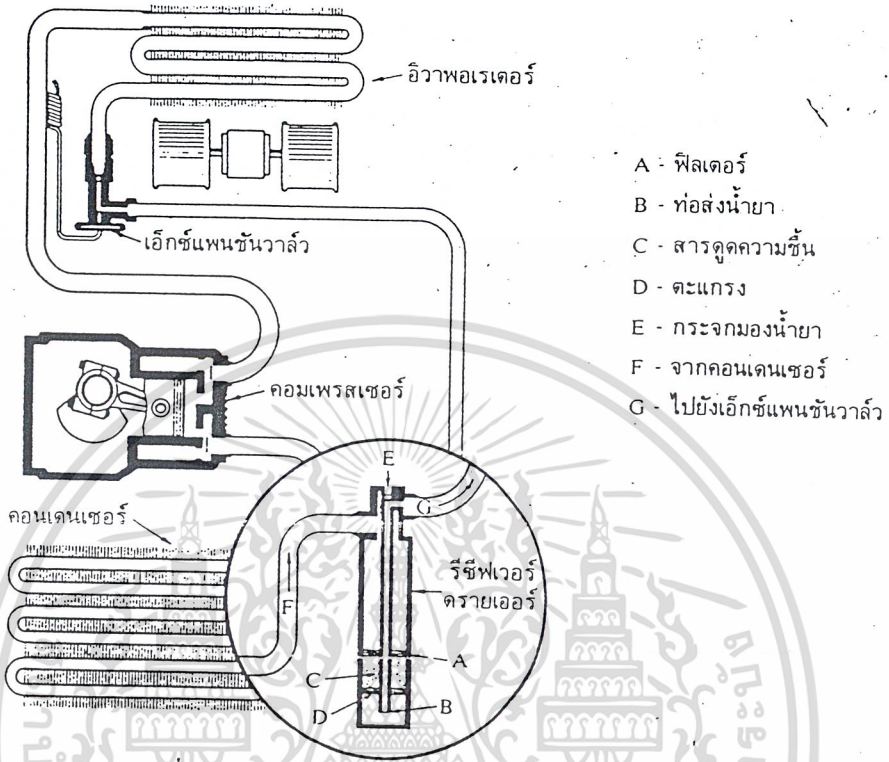
ขนาดของคอนเดนเซอร์มักจะถูกจำกัดโดยเนื้อที่สำหรับการติดตั้งท่อทางเดินน้ำยาอาจเป็นชั้นเดียวหรือสองชั้น บางครั้งอาจถึงสามชั้น ซึ่งการเพิ่มจำนวนชั้นเป็นการเพิ่มปริมาตรภายในท่อทางเดินน้ำยาของคอนเดนเซอร์ ช่วยให้การระบายความร้อนกระทำได้ดียิ่งขึ้น

ดังได้กล่าวมาแล้วว่าท่อทางเดินน้ำยาที่เข้าทางคอนเดนเซอร์จะอยู่ข้างบนเสมอ เพื่อว่าเมื่อน้ำยากลับตัวเป็นน้ำยาเหลวแล้วจะตกลงมาตอนล่างและส่งต่อเข้ายังรีซีฟเวอร์ดรายเออร์(Receiver-Drier)ต่อไป ซึ่งถ้าต่อท่อคอนเดนเซอร์เข้าทางด้านล่างแล้วน้ำยาในสถานะแก๊สจะต้องดันผ่านน้ำยาเหลวทำให้ความดันในคอนเดนเซอร์สูงเกินเกณฑ์

ในการซ่อมบริการเกี่ยวกับคอนเดนเซอร์จะต้องมีความระมัดระวังให้มาก เพราะสถานะของน้ำยาในคอนเดนเซอร์มีสถานะเป็นทั้งของเหลวและแก๊สที่มีความดันสูง ถ้าน้ำยาเหลวถูกผิวหนังหรือเข้าตาจะเกิดอันตรายได้

2.3.4) ท่อรีซีฟเวอร์ดรายเออร์(receiver and drier) หรือท่อพักน้ำยาและตัวดูดรับความชื้น เป็นอุปกรณ์ตัวหนึ่งที่ใช้สำหรับเป็นที่พักน้ำยาเหลวทำด้วยกระบอกโลหะ มีข้อต่อทางเข้าและทางออกของน้ำยา ส่วนมากมีกระจกมองน้ำยา(sight glass) ติดอยู่ด้วย รีซีฟเวอร์ดรายเออร์ติดตั้งอยู่ทางด้านความดันสูงของระบบ(high pressure side) ในช่วงที่ต่อจากคอนเดนเซอร์น้ำยาที่เข้ามาพักในรีซีฟเวอร์ดรายเออร์อาจแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ รีซีฟเวอร์ทำหน้าที่เป็นที่พักน้ำยาเหลว และดรายเออร์เป็นตัวดูดรับความชื้นในระบบ

รีซีฟเวอร์ดรายเออร์นับว่าเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอันหนึ่งในระบบเครื่องปรับอากาศรถยนต์ เพราะจะทำหน้าที่เก็บน้ำยาเหลวให้มีมากเพียงพอสำหรับฉีดเข้าไปในอิวาพอเรเตอร์



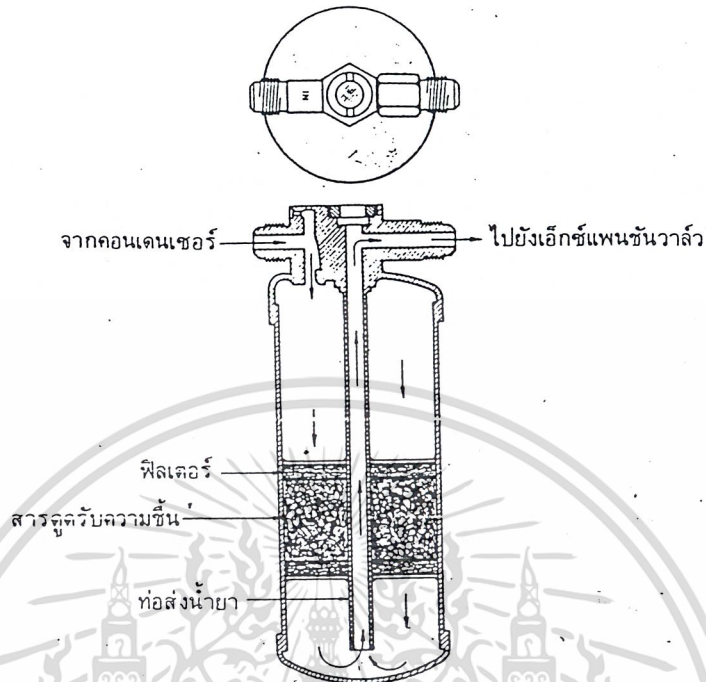
- A - ฟิวเตอร์
- B - ท่อส่งน้ำยา
- C - สารดูดความชื้น
- D - ตะแกรง
- E - กระจกมองน้ำยา
- F - จากคอนเดนเซอร์
- G - ไปยังเอ็กซ์แพนชันวาล์ว

รูป 36 แสดงตำแหน่งที่ติดตั้งรีซีฟเวอร์-ดรายเออร์ในระบบ

เครื่องปรับอากาศยี่ห้อแรกๆ ถูกออกแบบให้มีท่อพักน้ำยาเหลวแยกต่างหากจากตัวดูดรับความชื้นและกระจกมองน้ำยา ซึ่งตัวดูดรับความชื้นมักจะมีฟิวเตอร์ (filter) และอยู่ในระบบต่อจากท่อพักน้ำยาเหลว ส่วนกระจกมองน้ำยาต่ออยู่กับทางออกของตัวดูดรับความชื้นอีกที่หนึ่ง ก่อนที่น้ำยาจะถูกส่งเข้ายังเอ็กซ์แพนชันวาล์ว (expansion valve)

ที่ท่อทางเข้าของท่อพักน้ำยาและตัวดูดรับความชื้นจะมีตะแกรงหรือสกรีนกรอง (screen) ป้องกันฝุ่นผงที่อาจหลงเหลืออยู่ภายในระบบมิให้ไปอุดตันที่ลิ้นของเอ็กซ์แพนชันวาล์ว ตะแกรงกรองนี้จะถอดออกมาล้างหรือเปลี่ยนใหม่ได้เมื่อเกิดการอุดตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 37 รีซีเพอร์ครายเออร์

สารดูดความชื้น(desiccant) จะเป็นสารในสถานะของแข็ง ซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดซับความชื้นจากแก๊สหรือของเหลวหรือแม้แต่ของแข็ง

ปกติสารดูดความชื้นในระบบเครื่องปรับอากาศรถยนต์จะใช้ซิลิกาเจล (Silica-Gel) หรือโมบิลเจล (Mobil-Gel) ซึ่งสารนี้มักบรรจุอยู่ระหว่างตะแกรงกรองภายในท่อพักน้ำยาเหลวหรืออาจบรรจุอยู่ในถุงโลหะพูนภายในท่อพักน้ำยาเหลวเช่นกัน ช่วยป้องกันมิให้สารดูดความชื้นหลุดออกจากภายในท่อพักเข้าไปในระบบ

ความสามารถในการดูดความชื้นจะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารที่ใช้ เช่น ซิลิกาเจลจำนวน 5 ลูกบาศก์นิ้ว จะสามารถดูดความชื้นได้ประมาณ 100 หยคของน้ำที่อุณหภูมิ 150 องศาฟาเรนไฮด์

2.3.5) ฟิลเตอร์ (filter) ตามปกติฟิลเตอร์ทำด้วยสารซึ่งสามารถให้น้ำยาทำความเย็นผ่านได้แต่จะป้องกันสารดูดความชื้น ผุ่นผง หรือสิ่งสกปรกอื่นๆ ที่ติดมากับน้ำยาทำความเย็นมิให้ผ่านไปได้ ตัวดูดความชื้นบางแบบจะมีฟิลเตอร์ทั้งสองด้าน ซึ่งน้ำยาจะต้องผ่านฟิลเตอร์ทั้งสองและสารดูดความชื้นก่อนออกจากท่อพักน้ำยาเหลวนี้แต่สารดูดความชื้นบางแบบจะไม่มีฟิลเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.6) ท่อส่งน้ำยา (pickup tube) น้ำยาที่ถูกส่งเข้ามาพักในท่อพักน้ำยานี้ส่วนใหญ่จะเป็นน้ำยาเหลวแต่จะมีบางส่วนที่ยังคงสถานะเป็นแก๊สอยู่ ท่อพักน้ำยานี้จะทำหน้าที่แบ่งให้น้ำยาเหลวอยู่ที่ส่วนล่างของท่อพัก และส่วนที่เป็นแก๊สจะอยู่ที่ส่วนบนของท่อพัก สำหรับท่อส่งน้ำยาจะเริ่มจากส่วนล่างของท่อพักทำให้แน่ใจได้ว่าที่ส่งผ่านขึ้นมาจะเป็นน้ำยาเหลวทั้งหมด 100 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีแก๊สผสมติดขึ้นมาด้วยก่อนส่งผ่านเข้ายังเอ็กซ์เพนชันวาล์ว

2.3.7) ตะแกรงกรอง (strainer) ตะแกรงกรองทำด้วยลวดเล็กๆ สาานเป็นตะแกรงอยู่ในท่อพักน้ำยาทำหน้าที่ป้องกันมิให้ฝุ่นผงผ่านทอร์ชิวเวอร์ตราเยอร์เข้าไปในระบบหรือทำหน้าที่เช่นเดียวกับฟิลเตอร์นั่นเอง ท่อพักน้ำยาบางแบบจะมีตะแกรงกรองสองอันปิดครอบหัวท้ายของสารดูดความชื้น ถ้าตัวดูดความชื้นใดไม่มีฟิลเตอร์อยู่ก็ต้องมีตะแกรงกรองทำหน้าที่แทนเสมอ น้ำยาเหลวจะต้องผ่านตะแกรงกรองนี้ก่อนส่งออกจากท่อพักน้ำยาเหลว

2.3.8) กระจกมองน้ำยา(sight glass) กระจกมองน้ำยามักจะติดตั้งอยู่ที่ท่อพักน้ำยาเหลวหรือที่ท่อทางออกของทอร์ชิวเวอร์ตราเยอร์กระจกมองน้ำยานี้ใช้สำหรับให้ช่างบริการดูน้ำยาภายในระบบว่ามีเพียงพอและไม่มีฟองอากาศผ่าน แสดงว่าน้ำยาในระบบมีน้อยและอาจเกิดการรั่วที่จุดใดจุดหนึ่งของท่อทางเดินภายในระบบวงจรน้ำยาของเครื่องปรับอากาศ

2.4 แบตเตอรี่

แบตเตอรี่นับได้ว่าเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากที่สุดของรถ ไฟฟ้าเลยทีเดียว เพราะนอกจากแบตเตอรี่จะเป็นแหล่งจ่ายพลังงานแล้ว ยังเป็นตัวที่บอกถึงอายุการใช้งานของรถไฟฟ้าในแต่ละรอบของการอัดและการจ่ายไฟของแบตเตอรี่ ทั้งยังเป็นตัวบอกประสิทธิภาพของรถไฟฟ้าด้วยการพัฒนาประสิทธิภาพของรถไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความสามารถในการพัฒนาแบตเตอรี่เป็นส่วนใหญ่ แต่การพัฒนาแบตเตอรี่เป็นไปได้อย่าง เมื่อเทียบกับการพัฒนาส่วนอื่นๆ ในระบบส่วนอื่น

แหล่งจ่ายพลังงานที่ใช้สำหรับรถไฟฟ้าในโครงการนี้ เป็นแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด (Lead-Acid Battery) มีแรงดันระหว่างขั้ว 12 V 26 ตัว มาอนุกรมกัน เพื่อให้ได้แหล่งจ่ายที่สามารถจ่ายแรงดันสูงสุดได้ 312 V ตามต้องการ

2.4.1 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด

แผ่นบวกของเซลล์ไฟฟ้าจะทำได้ด้วยตะกั่วไดออกไซด์ (PbO_2) มีสีน้ำตาล และแผ่นลบทำด้วยตะกั่วพูน (Pb) มีสีเทา มีกรดซัลฟริกทำหน้าที่เป็นตัวอิเล็กโทรไลต์

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้คือ

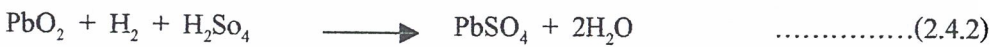


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อผู้อื่นและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่แผ่นบวก

1. ออกซิเจน(O) จากตะกั่วไดออกไซด์(PbO₂) จะรวมตัวกับไฮโดรเจน(H) จากกรดซัลฟริก (H₂SO₄) กลายเป็นน้ำ(H₂O)
2. ตะกั่ว(Pb) จากตะกั่วไดออกไซด์(PbO₂) จะรวมตัวกับอนุมูลซัลเฟต(SO₄) กลายเป็นตะกั่วซัลเฟต(PbSO₄)

ทำให้ได้ปฏิกิริยาเคมีรวมที่แผ่นบวกดังนี้



ที่แผ่นลบ

ตะกั่ว(Pb) จะรวมตัวกับอนุมูลซัลเฟต(SO₄) กลายเป็นตะกั่วซัลเฟต(PbSO₄) จะได้ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นที่แผ่นลบ เป็นดังนี้



จะเห็นว่าเมื่อจ่ายไฟแล้วจะทำให้เกิดตะกั่วซัลเฟตขึ้นที่ทั้ง 2 แผ่น และน้ำที่เกิดขึ้นจะไปเจือจางความเข้มข้นของกรดซัลฟริก ฉะนั้นเมื่อเกิดปฏิกิริยาเคมีไปนานๆ กระแสที่ได้ก็จะลดลง ขณะที่อัดไฟจะเกิดปฏิกิริยาเคมีตรงกันข้ามกับตอนจ่ายไฟ คือตะกั่วซัลเฟต(PbSO₄) จะแตกตัวเป็นตะกั่ว(Pb) กับอนุมูลซัลเฟต(SO₄) ที่แผ่นทั้งสอง ส่วนน้ำจะแตกตัวเป็นไฮโดรเจน(H) กับออกซิเจน(O) โดยที่ไฮโดรเจนจะจับตัวกับอนุมูลซัลเฟตได้เป็นกรดซัลฟริกและออกซิเจนจะจับตัวกับตะกั่วเป็นตะกั่วไดออกไซด์

2.4.2 ขนาดความจุ(Capacity)

ขนาดความจุของแบตเตอรี่ แสดงเป็นค่าแอมแปร์-ชั่วโมง(A-h) ซึ่งค่านี้จะหมายถึงปริมาณไฟฟ้าที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายออกมาได้ภายใต้ อุณหภูมิ กระแสและแรงดันสุดท้าย(Cut Off Voltage) ที่กำหนดให้

วิธีการวัดขนาดความจุของแบตเตอรี่จาก มอก. ฉบับที่ 9 ว่าด้วยเรื่อง แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ให้ระบุนอัตราการจ่ายไฟต่อ 20 ชั่วโมง(20 hour rating)เป็นมาตรฐาน ความจุที่อัตรา 20 ชั่วโมงหรือ C คือ ขนาดความจุที่ได้จากการจ่ายไฟ(discharge) เป็นเวลา 20 ชั่วโมง ซึ่งจะเป็นค่าขนาดความจุที่ระบุไว้ที่ตัวแบตเตอรี่

ขนาดความจุในการจ่ายไฟ(Discharge Capacity) หรือC สามารถหาได้จากสมการ

$$C = \int Idt \dots\dots\dots(2.4.4)$$

เมื่อ : t : discharge time เวลาเริ่มจ่ายไฟจนถึงสภาวะ end of cell หรือจนถึงระดับ

แรงดันสุดท้าย ในห้องปฏิบัติการหรือในทางทฤษฎี มักจะกำหนดด้วยระดับแรงดันสุดท้ายสำหรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด แรงดัน 12 V ระดับแรงดันสุดท้ายจะเท่ากับ 10.5 V หรือ 1.75 V/cell

2.4.3 แรงดันแบตเตอรี่(Battery Voltage)

แรงดันแบตเตอรี่เป็นค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วของแบตเตอรี่ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วในสภาพไร้โหลด(แบตเตอรี่เปิดวงจร) จะเป็นฟังก์ชันของการเกิดประจุของแบตเตอรี่ แต่ขณะที่มีโหลด แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วจะเป็นฟังก์ชันของกระแสโหลด การเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันของแบตเตอรี่จะมีผลต่อการควบคุมความเร็วของรถไฟฟ้ามาก

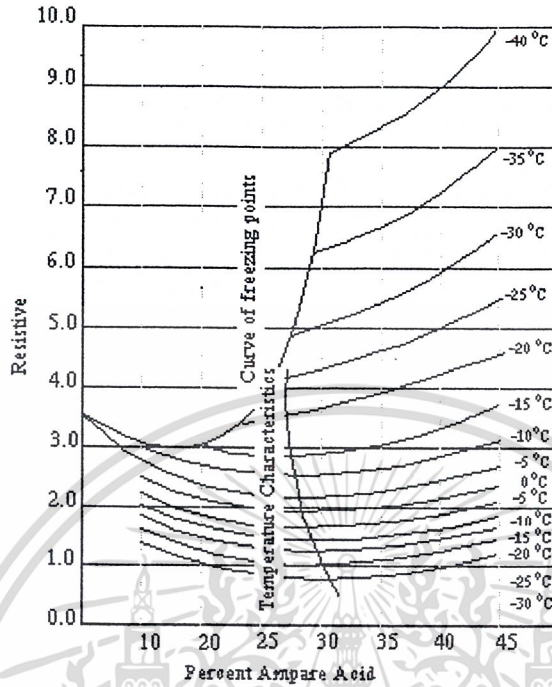
2.4.4 ความต้านทานภายในของแบตเตอรี่(Battery Internal Impedance)

ค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่ ขณะมีโหลดค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่นั้นเกิดจากปรากฏการณ์ทางเคมีที่เกิดขึ้นภายในของแบตเตอรี่ ในขณะที่เกิดการถ่ายเทประจุไฟฟ้าเช่น ปรากฏการณ์โพลาไรเซชันซึ่งจะทำให้เกิดประจุไฟฟ้าใกล้ๆ ผิวของแผ่นขั้วอิเล็กโทรดซึ่งจะทำให้กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการไหลของไอออนระหว่างแผ่นขั้วอิเล็กโทรดมีค่าลดลง ดังนั้นปรากฏการณ์นี้จึงเสมือนค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่นั่นเอง

2.4.5 คุณสมบัติของอุณหภูมิ(Temperature Characteristics)

อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในตัวแบตเตอรี่จะมีผลต่อการทำงาน และขนาดความจุของแบตเตอรี่มาก เนื่องจากอุณหภูมิมิผลต่อน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าความต้านทานของน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ แสดงดังรูป38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 38 ความสัมพันธ์ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความต้านทานของสารละลายกรดซัลฟูริก

เมื่อแบตเตอรี่ถูกอัดไฟเต็มที่ ค่าความถ่วงจำเพาะถูกจำกัดอยู่ประมาณ 1.280 และเมื่อแบตเตอรี่ถูกนำไปจ่ายไฟ ค่าความถ่วงจำเพาะก็จะลดต่ำลง แต่ไม่ควรที่จะต่ำกว่าเส้น freezing point curve จากรูปกราฟ จะเห็นว่าค่าความต้านทานจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมาก เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส(32 องศาฟาเรนไฮด์)

ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิต่ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ช้า ทำให้พลังงานที่ได้ลดลง ตารางแสดงถึงค่าประสิทธิภาพเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ ของขนาดความจุของแบตเตอรี่เมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิต่างๆ

จากการศึกษาพบว่าขนาดความจุของแบตเตอรี่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับอุณหภูมิ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้น 1 องศา ขนาดความจุจะเพิ่มขึ้น 1 % ของความจุที่ 15 องศาเซลเซียส จากตารางทำให้ทราบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด คือ ประมาณ 26.7 องศาเซลเซียส หรือ 80 องศาฟาเรนไฮด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 3 เปรียบเทียบขนาดความจุของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดที่อุณหภูมิปกติและที่ต่ำกว่าปกติ

Relative Capacity of Lead-Acid Storage Battery at Normal and Low Temperature			
Temperature		Percentage of Capacity at 80°F, 20-Hr Rate	
°C	°F	20-Hr Rate	20-Ahr Rate
25	80	100	48
15	60	99	50
4	40	77	81
-7	20	68	24
-18	0	40	17
-30	-20	35	9
-40	-40	21	4
-51	-60	9	-

รูป 39 เปรียบเทียบขนาดความจุของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดที่อุณหภูมิปกติและที่ต่ำกว่าปกติ

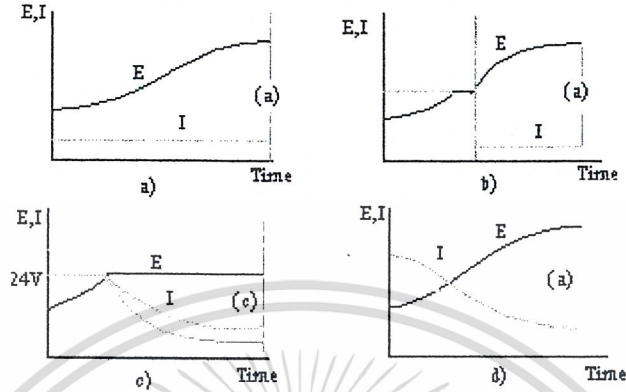
2.4.6 คุณสมบัติของการอัดไฟ(Charge Characteristics)

ในการอัดไฟเข้าแบตเตอรี่นั้นสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงมากที่สุด คือ ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนเป็นก๊าซที่ไวไฟ ดังนั้นจึงต้องมีระบบการระบายก๊าซที่เกิดขึ้นให้ดี ในการอัดไฟที่กระแสสูงก็จะยิ่งทำให้เกิดความร้อนขึ้น เป็นผลให้เกิดก๊าซมากขึ้นด้วย ความร้อนที่เกิดขึ้นในช่วงระหว่างการอัดไฟไม่ควรเกิน 55 องศาเซลเซียส

วิธีการอัดไฟมีด้วยกัน 4 วิธี คือ

1. การอัดไฟด้วยกระแสคงที่(Charging with constant current)
2. การอัดไฟด้วยกระแสเป็นช่วงๆ (Charging with intermittent constant current)
3. การอัดไฟด้วยแรงดันคงที่และจำกัดกระแส(Charging with constant voltage and current limitation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ การอัดไฟด้วยกระแสไม่คงที่(Charging with tapered current)เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 40 กราฟแสดงการอัดไฟในแต่ละระบบ

การอัดไฟด้วยกระแสคงที่ที่ใช้เวลาในการอัดนาน(มากกว่า 12 ชั่วโมง) ส่วนในการอัดไฟที่ต้องการเวลาในการอัดไฟสั้น(Fast Charge) โดยทั่วไปมักจะใช้วิธี IE characteristics มากกว่า W characteristics

2.4.7 คุณสมบัติในการจ่ายไฟ(Discharge Characteristics)

ขณะที่การใช้กำลังงานเพิ่มมากขึ้น พลังงานที่เก็บสะสมไว้ในแบตเตอรี่ก็จะค่อยๆ ลดลงตามไปด้วย การที่พลังงานเหล่านี้ลดลง เนื่องจากการลดลงของระดับแรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่ ซึ่งเกิดจากการเพิ่มของกระแสไหลลด ประจุในตัวของแบตเตอรี่ก็จะค่อยๆ ลดลงพลังงานจากแบตเตอรี่จะค่อยๆ ลดลงในขณะที่มีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น ซึ่งการที่แบตเตอรี่ลดลงนี้มีสาเหตุมาจาก

พลังงานลดลงเนื่องจากการลดลงของประจุในแบตเตอรี่ตามขนาดของกระแสที่จ่ายออกไป
พลังงานลดลงเนื่องจากแรงดันที่ขั้วลดลง

จากสาเหตุทั้ง 2 นี้ ทำให้เกิดความสัมพันธ์ของความจุของแบตเตอรี่กับกระแสที่จ่ายออกไปและเวลาที่ใช้ซึ่งเรียกว่า สมการของ Peukert ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$I^n t = C \dots\dots\dots(2.4.5)$$

เมื่อ

n และ t เป็นค่าคงที่

I คือ กระแสที่จ่ายออกไปมีค่าคงที่ มีหน่วยเป็นแอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ค่า n และ C นั้นหาได้จากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบที่กระแสคงที่
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดเบี่ยงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_1^n t_1 = C \quad \dots\dots\dots(2.4.6)$$

$$I_2^n t_2 = C \quad \dots\dots\dots(2.4.7)$$

$$n \log I_1 = \log C - \log t_1 \quad \dots\dots\dots(2.4.8)$$

$$n \log I_2 = \log C - \log t_2 \quad \dots\dots\dots(2.4.9)$$

$$n = \frac{\log t_2 - \log t_1}{\log I_1 - \log I_2} \quad \dots\dots\dots(2.4.10)$$

โดยที่ $n = 1.0$ สำหรับกระแสต่ำมากๆ

$n = 2.0$ สำหรับกระแสสูงมากๆ

2.4.8 ข้อควรระวังในการใช้งานและการบำรุงรักษาแบตเตอรี่

1. อย่าทำการอัดไฟเข้าแบตเตอรี่ ด้วยขนาดกระแสที่มากเกินไป การอัดไฟเข้าด้วยขนาดกระแสที่มากเกินไปนี้ จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นสูงในแบตเตอรี่ เป็นเหตุให้น้ำยาอิเล็กโทรไลต์ กลายเป็นไอ และเกิดก๊าซไฮโดรเจนมาก เกิดปฏิกิริยาเคมีอย่างรุนแรงเป็นเหตุให้แผ่นตะกั่วเกิดการ บิดตัว สารที่เคลือบไว้หลุดร่วงและเปลือกแบตเตอรี่เสียหาย

2. อย่าปล่อยให้แบตเตอรี่จ่ายไฟออกมากเกินไป การปล่อยให้แบตเตอรี่จ่ายไฟออกจนหมดจะทำให้เกิดเกลือกำมะถัน(ตะกั่วซัลเฟต)ไปจับที่แผ่นตะกั่ว การที่มีเกลือกำมะถันไปจับที่แผ่น ตะกั่วมากๆ จะทำให้ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ลดลง และการแก้ไขคืนสู่สภาพปกติทำได้ยาก

3. ระวังรักษาขั้วแบตเตอรี่ให้สะอาดและแน่นอยู่เสมอ หากมีเกลือกำมะถันไปจับอยู่ที่ขั้ว ให้ใช้น้ำร้อนล้างทำความสะอาดและควรเคลือบขั้วแบตเตอรี่ไว้ด้วยจารบีซิลิโคนหรือวาสลีน เพื่อ ป้องกันการสึกกร่อน

4. ทำการตรวจสอบความถ่วงจำเพาะตามระยะเวลา(1 หรือ 2 สัปดาห์ต่อครั้ง)และรักษาให้ ระดับน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ อยู่เหนือแผ่นตะกั่ว 10 – 15 mm.เสมอ หากทิ้งให้แผ่นตะกั่วแห้งเป็น เวลานาน จะทำให้ประสิทธิภาพของแผ่นตะกั่วเสื่อมลง ขนาดความจุของแบตเตอรี่จะลดลงด้วย หากน้ำยาพร่องให้เติมด้วยน้ำกลั่นบริสุทธิ์

5. อย่าปล่อยให้แบตเตอรี่มีการจ่ายไฟด้วยกระแสจำนวนมากๆเป็นเวลานานติดต่อกัน ควร หยุดทิ้งช่วงระยะเวลาประมาณ 30 วินาที เพื่อให้แบตเตอรี่มีเวลาปรับตัวคืนสภาพ

อย่าให้เกิดประกายไฟหรือนำเปลวไฟเข้ามาใกล้แบตเตอรี่ ในขณะที่ทำการอัดไฟ เนื่องจาก ว่าในช่วงที่ทำการอัดไฟนั้น จะมีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้น ซึ่งก๊าซนี้เป็นสารไวไฟหากมีประกายไฟ หรือเปลวไฟอยู่ใกล้ๆจะทำให้เกิดการระเบิดขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. อย่าทำให้เกิดประกายไฟ หรือนำเปลวไฟมาใกล้แบตเตอรี่ในขณะที่ทำการอัดไฟ เนื่องจากว่าในขณะที่มีการทำการอัดไฟนั้น จะมีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้น ซึ่งก๊าซไฮโดรเจนนี้เป็นสารไวไฟ หากมีเปลวไฟหรือประกายไฟอยู่ใกล้ๆ จะทำให้เกิดการระเบิดขึ้น

7. เมื่อไม่ได้มีการใช้งานแบตเตอรี่เป็นเวลานาน ให้ปลดขั้วแบตเตอรี่ออก และนำแบตเตอรี่ไปอัดไฟให้เต็มทุกๆ 2 สัปดาห์ เพื่อป้องกันไม่ให้แบตเตอรี่เกิดการเสื่อมสภาพ

8. แบตเตอรี่ใหม่ที่ยังไม่ได้มีการเติมน้ำยาอิเล็กโทรไลต์มา เมื่อทำการอัดไฟให้เติมน้ำยาอิเล็กโทรไลต์แล้วทิ้งไว้ประมาณ 8 ชั่วโมง เพื่อให้แผ่นตะกั่วได้อาบน้ำยาจนอิ่มตัว แล้วจึงทำการจ่ายไฟด้วยกระแสประมาณ 3-5 แอมป์ (หรือ 1 ใน 10 ของขนาดความจุ) เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 8 ชั่วโมง

2.4.9 ขั้นตอนในการอัดไฟเข้าแบตเตอรี่ (Charging Method)

การอัดไฟแบบกระแสคงที่ (Constant Current Charging)

1. ทำความสะอาดสิ่งสกปรกหรือสิ่งแปลกปลอมอื่นๆ ที่จับอยู่บนแบตเตอรี่ โดยเฉพาะที่ขั้วของแบตเตอรี่
2. เปิดฝาจากเติมน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ออก เพื่อให้ก๊าซที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการอัดไฟระบายออกไปได้โดยง่าย
3. ตรวจสอบระดับน้ำยาอิเล็กโทรไลต์จะต้องอยู่เหนือแผ่นตะกั่ว 10-15 มม. ถ้าขาดให้เติมน้ำกลั่นบริสุทธิ์
4. ต่อขั้วเครื่องประจุเข้ากับขั้วของแบตเตอรี่ให้ถูกต้อง
5. ทำการอัดไฟด้วยกระแสประมาณ 1/10 ของขนาดความจุแบตเตอรี่
6. ในขณะที่ทำการอัดไฟ ต้องคอยระวังอย่าให้อุณหภูมิของน้ำยาอิเล็กโทรไลต์สูงเกินกว่า 40 องศาเซลเซียส ถ้าเกินให้ลดกระแสในการอัดไฟให้ต่ำลง หรือหยุดทำการอัดไฟจนกว่าอุณหภูมิของน้ำยาลดลง

7. อย่าทำให้เกิดประกายไฟหรือนำเปลวไฟเข้ามาใกล้แบตเตอรี่ในขณะที่ทำการอัดไฟ เพราะมีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นแต่กระจายในขณะที่ทำการอัดไฟ

8. การอัดไฟจะเสร็จสิ้น เมื่อค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำยาอิเล็กโทรไลต์สูงขึ้นไปถึงค่าที่กำหนด และยังคงอ่านค่าสูงสุดนั้นได้อยู่เมื่อทำการอัดไฟไปแล้ว 1 ชั่วโมง

9. เมื่อทำการอัดไฟเสร็จสิ้นลง หากค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำยาอิเล็กโทรไลต์สูงกว่าค่าที่กำหนด ให้ดูดน้ำยาออกทิ้งบางส่วนแล้วเติมน้ำกลั่น ในทางตรงกันข้ามถ้าค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าค่าที่กำหนดให้ดูดน้ำยาทิ้งแล้วเติมน้ำกรดกำมะถันเจือจาง

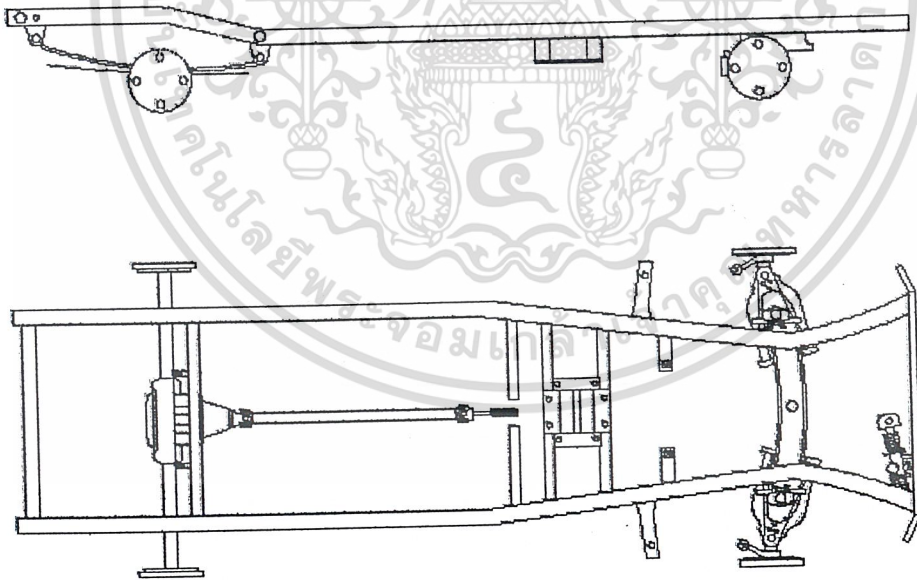
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงวิชาการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การคำนวณและการสร้าง

3.1 ลักษณะโครงสร้างของรถ

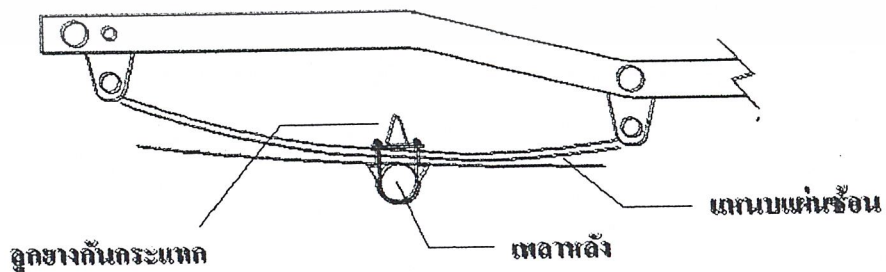
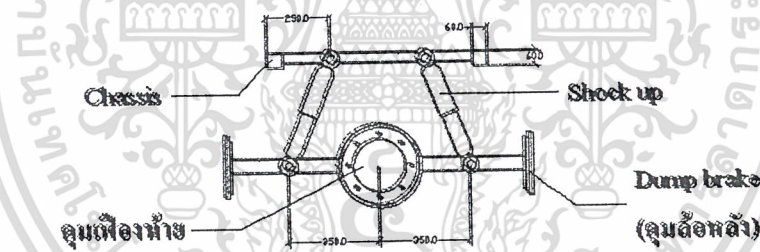
3.1.1 แชสซี (Chassis) เนื่องจากเป็นสิ่งที่ต้องรองรับน้ำหนักของตัวถังรถ รวมถึงรับแรงกระแทกจากตัวถังกับพื้นถนน ทำให้ต้องใช้เหล็กแข็งแรงมาเป็น Chassis ในการรองรับน้ำหนักของตัวถังรถเพื่อให้เกิดความมั่นคงในการขับขี่ ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติบางอย่างของเหล็ก จึงมีการนำเหล็กผสมดีบุกมาผลิตเป็น Chassis และเพื่อให้เกิดความแข็งแรงและมีน้ำหนักเบาในตัวของ Chassis จึงนำเอาเหล็กที่มีลักษณะเป็นรูปตัว C มาประกอบกัน เมื่อมองหน้าตัดเหล็กแล้วจะเห็นเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า รูปร่างและรายละเอียดของ Chassis ต่าง ๆ แสดงดังรูป 41



รูป 41 โครงสร้างทาง Mechanic ของ Chassis ของรถไฟฟ้า AC

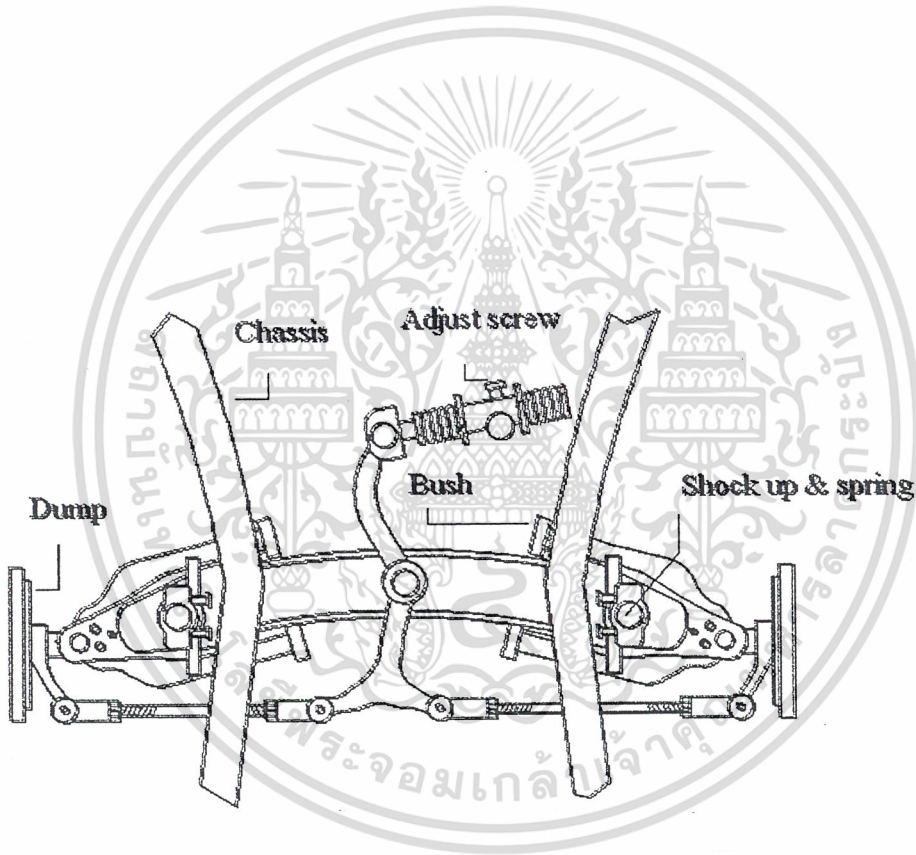
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 ระบบกันสะเทือน ระบบกันสะเทือนเป็นอุปกรณ์ในการรองรับแรงจากการกระแทก และรับน้ำหนักของตัวรถ เป็นอุปกรณ์ที่รับแรงต่อมาจากยางรถยนต์ ระบบกันสะเทือนที่ใช้กับรถไฟฟ้า AC คันนี้ ระบบกันสะเทือนล้อหน้าและล้อหลังไม่เหมือนกัน ระบบกันสะเทือนของล้อหน้าเป็นแบบปีกนกคู่อิสระ ประกอบกับสปริงและโช้คอัพ (Spring & Shock up) ระบบกันสะเทือนของล้อหลังเป็นแบบแหนบและโช้คอัพ ระบบกันสะเทือนล้อหน้าจะแตกต่างจากรถกระบะทั่วไป ที่จะมี Torsion bars & Shock up ในส่วนของโช้คอัพเป็นแบบ Semi Gas – oil จะมีความแข็งในการรับแรงซึ่งสามารถรับแรงได้มากกว่าแบบ Oil ไม่ขยับขยาดจนเกินไป ระบบกันสะเทือนของล้อหลังเป็นแบบแหนบ จำนวน 4 แผ่นต่อข้าง เพื่อรองรับน้ำหนักของตัวถังรถและแบตเตอรี่จำนวน 26 ลูก เสริมด้วย Shock up แบบ semi Gas – oil รูปแบบและโครงสร้างของระบบกันสะเทือนของรถไฟฟ้า AC แสดงดังรูป 42



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูป 42 ระบบกันสะเทือนของรถไฟฟ้า AC
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแบบลงเนื้อหาและต้องยกย่องเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 ระบบบังคับเลี้ยว ระบบบังคับเลี้ยวจะส่งกำลังจากพวงมาลัยมาที่ขอยกจากบาทโดยตรง จากขอยกจากบาทจะผ่านมาที่ลูกยางคัปปลิง(Couling) และส่งไปที่กระปุกพวงมาลัย กระปุกพวงมาลัยของรถไฟฟ้าAC เป็นแบบเฟืองตัวหนอนสไลด์(Slide)ในการเคลื่อนที่ของแกนชักจะเคลื่อนที่ในแนวระนาบ ซึ่งจะแตกต่างจากกระปุกพวงมาลัยทั่วไปที่จะเคลื่อนที่เป็นรูปวงกลม การทำงานของระบบบังคับเลี้ยวจะแสดงดังรูป 43



รูป 43 ระบบบังคับเลี้ยว

ระบบการทำงานของระบบบังคับเลี้ยว เมื่อบังคับพวงมาลัยกระปุกพวงมาลัยจะทำงานตามอัตราเฟืองทด แล้ว Bush rod จะไปคั่นหรือจะไปค้ำคันทิ้ง โดยที่จุดหมุนของคันทิ้งจะอยู่ที่ตัวแชนซีคันทิ้งจะส่งแรงต่อไปยังคันทิ้ง ซึ่งจะบังคับคุมของล้อให้ไปในทิศทางที่เราต้องการ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตบแชนซีและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

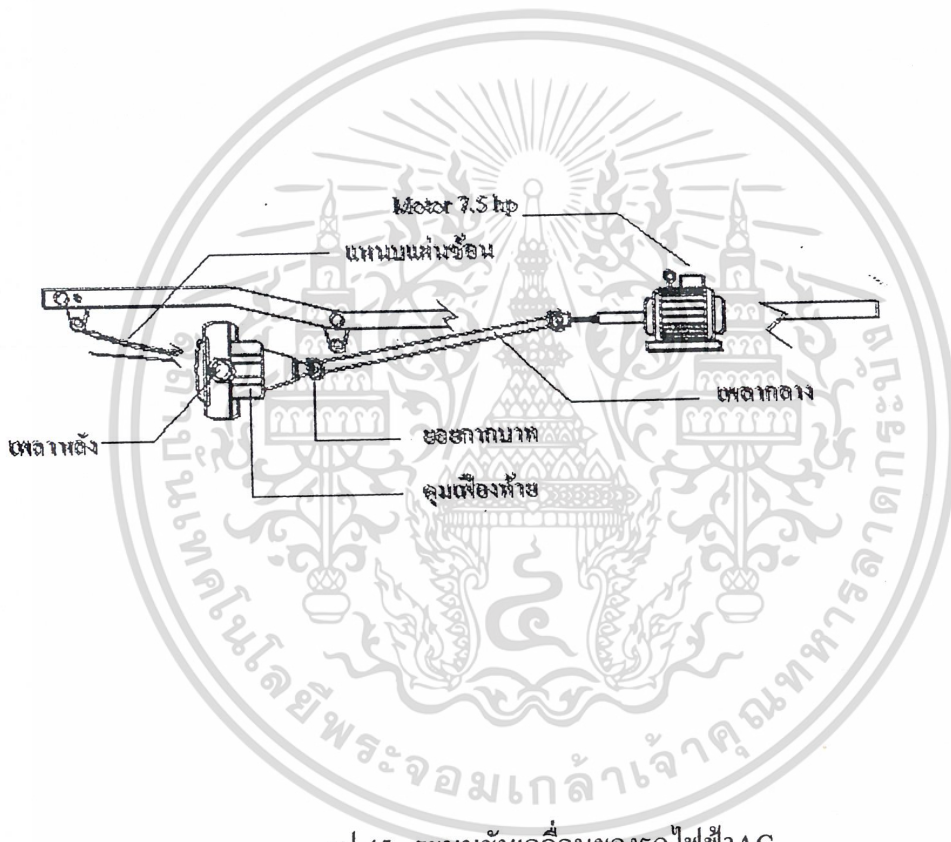
3.1.4 ระบบเบรก ระบบเบรกของรถนี้ เป็นแบบคัมพ์เบรก(Dump Break)ธรรมดา เนื่องจากเพราะรถ ไฟฟ้าไม่ได้ใช้ความเร็วสูงในการขับขี่ ไม่มีความจำเป็นที่ต้องใช้ระบบเบรกแบบดิสก์เบรก(Disk Break) เพื่อช่วยในการบังคับรถ การทำงานของระบบเบรกแบบคัมพ์เบรก จะใช้แรงทางกลโดยการเหยียบคันเบรกไปบังคับให้น้ำมันไฮดรอลิก(Hydraulic)ไปดันผ้าเบรก ให้ไปอัดกับผิวคุดล้อทั้ง 4 ซึ่งมีส่วนประกอบดังรูป 44



รูป 44 ระบบเบรกแบบคัมพ์เบรก(Dump brake)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

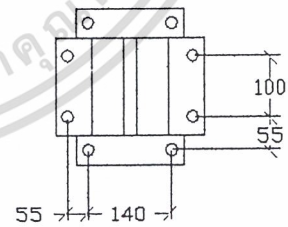
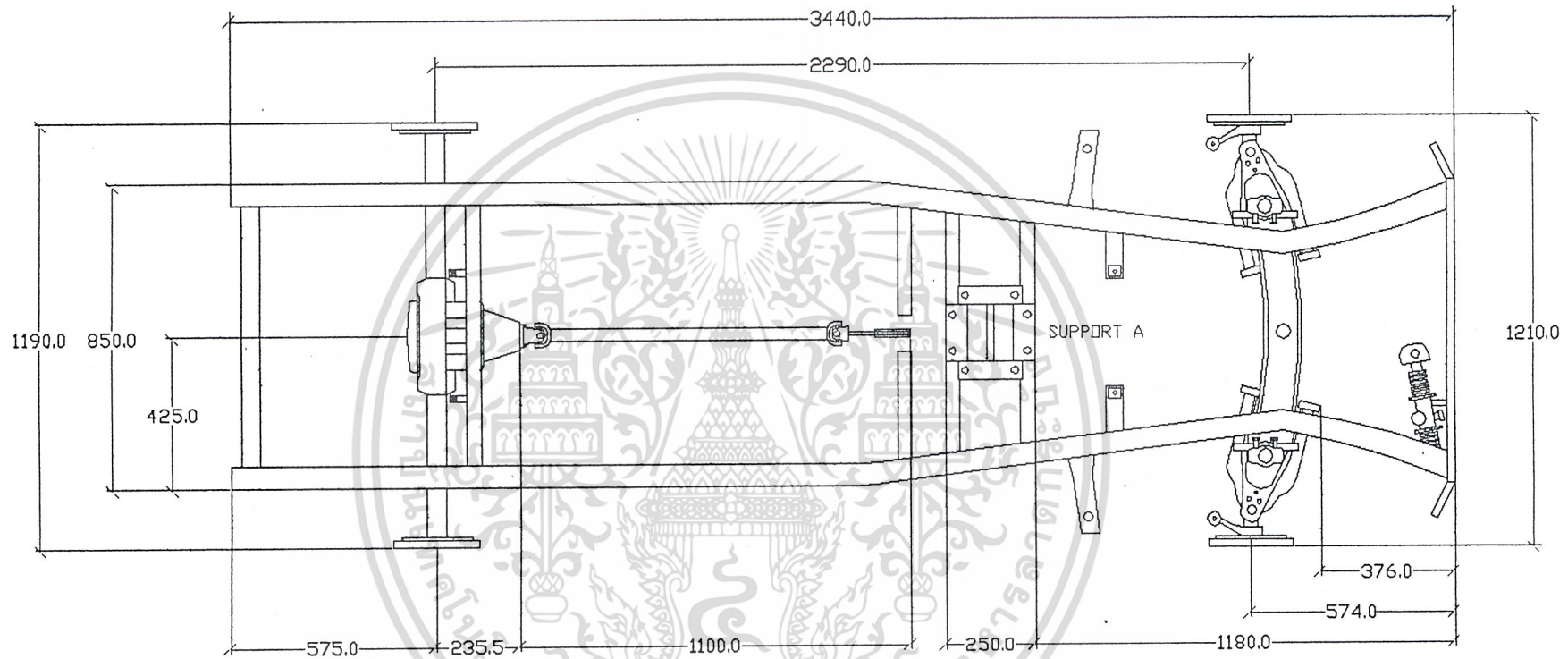
3.1.5 ระบบขับเคลื่อน ระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าAC จะได้รับกำลังมาจาก มอเตอร์อินดิคชัน ขนาด 7.5 Hp. ส่งกำลังไปหมุนเพลากลาง เพลากลางของรถจะเป็นแบบ Direct coupling และส่งไปยังเฟืองท้ายตามลำดับ ในระบบขับเคลื่อนส่วนที่สำคัญ จะต้องให้เพลาและเฟืองท้ายได้รับแรงจากมอเตอร์ โดยมีการลดการสูญเสียกำลังงานในส่วนนี้ให้น้อยที่สุด รถไฟฟ้าAC นี้ มีอัตราทดของเฟืองทั้งหมดเป็น 4:1 จากเฟืองจำนวน 3 ตัว ได้แก่ เฟืองเคียวหมู เฟืองไบสั เฟืองคอกจอก ระบบการขับเคลื่อนแสดงให้เห็นดังรูป 45



รูป 45 ระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าAC

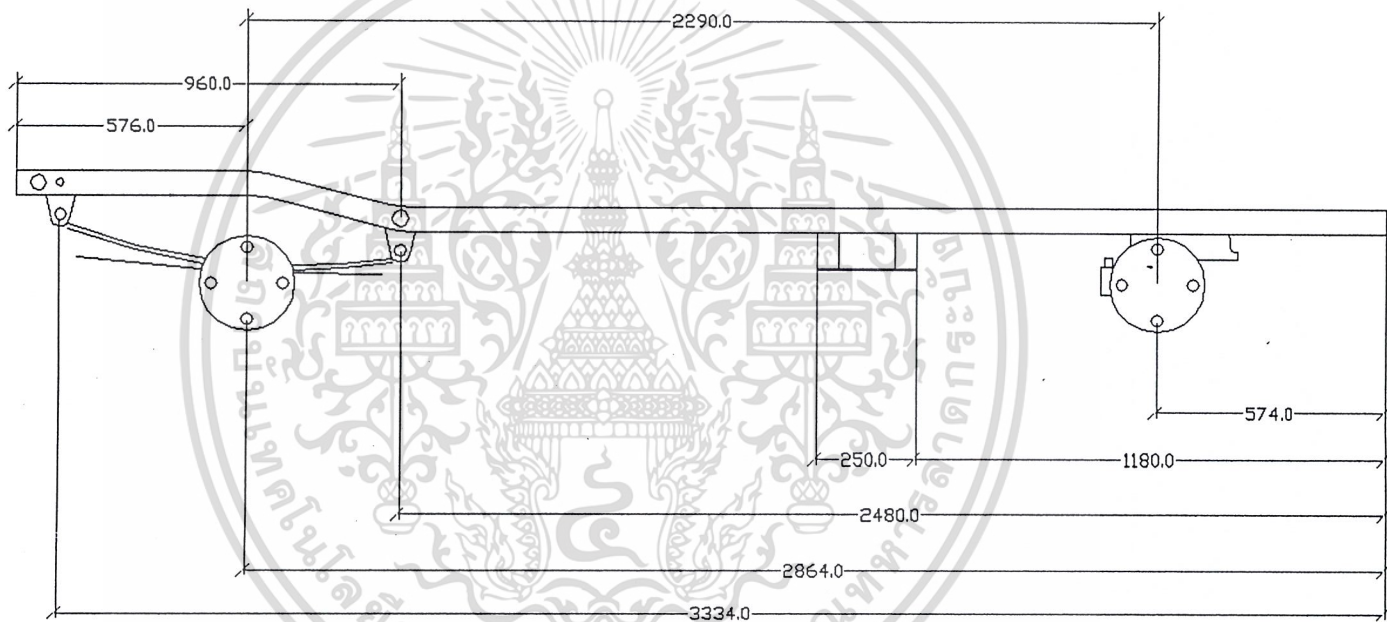
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 46 a) รายละเอียดของโครงสร้างถังล่าง(Chassis) มองจากด้านบน



DETAIL FOR SUPPORT A

รูป 46 b) รายละเอียดของโครงสร้างช่วงล่าง(Chassis) มองจากด้านบนข้าง



3.2 การเลือกขนาด 3 ϕ Induction Motor

ในการเลือกที่จะนำมอเตอร์อินดักชันมาใช้งานนั้น สามารถคำนวณหาขนาดของมอเตอร์ได้จากสูตรต่างๆ ดังนี้

$$\text{จากสูตร} \quad P = \frac{\mu WV}{102} \frac{100}{\eta}$$

เมื่อ W = น้ำหนักของรถยนต์ + น้ำหนักบรรทุก = 800 kg

μ = ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน(กำหนด) = 0.025

η = ประสิทธิภาพของมอเตอร์ = 80%

V = ความเร็ว(m/s)

และจากการวัดเส้นรอบวงของล้อ = 1.75 m.

อัตราทดของเพลารถยนต์ = 1:4

ที่ความถี่ 50 Hz มอเตอร์หมุนด้วยความเร็ว $N_s = \frac{120f}{p}$

กำหนดใช้มอเตอร์ 2 pole จะได้ $N_s = 3000$ rpm.

ความเร็วรอบของล้อรถยนต์ = $3000/4 = 750$ rpm.

ที่ความถี่ 50 Hz รถยนต์จะวิ่งด้วยความเร็ว = $750 \times 1.75 = 1312$ เมตร/นาที
= 78 กิโลเมตร/ชั่วโมง

ซึ่งจะได้

$$P = \frac{0.025 \times 800 \times \frac{1312}{60} \times 100}{102 \times 80} = 5.36 \text{ kW}$$

∴ เลือกมอเตอร์ขนาด 5.5 kW เป็นมอเตอร์ที่นำมาใช้ในรถไฟฟ้า ซึ่งมี Name Plate ดังนี้

NAME PLATE 3 ϕ Induction Motor

ELECTRIC MOTOR

WORKS -SF GHEORGHE

Type MA 132S38-2

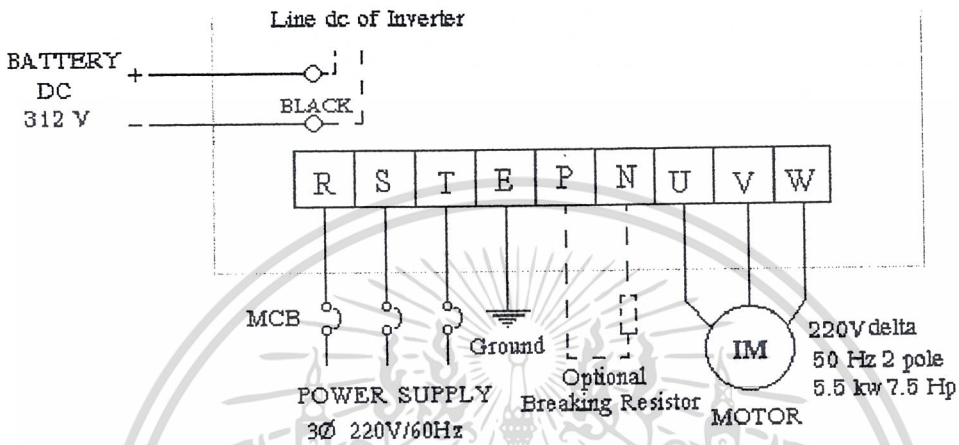
3~MOT	1998	Nr 1480
220/380V		20.11/11.61A
5.5 kW 7.5 Hp		cos ϕ 0.88
2880 rpm		50 c/s

Insul. Cl. B IP 54 52 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
MADE IN ROMANIA
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วงจรการต่อและการใช้งาน Inverter

การต่อ Main Circuit ของ Inverter



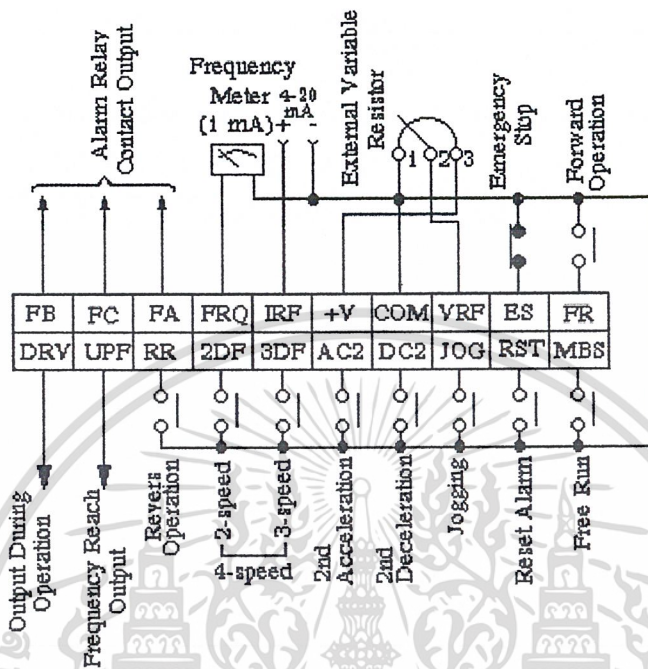
รูป 47 Terminal Connection Diagram of Main Circuit

ตาราง 4 Detail of Main Circuit Terminal

Symbol	Terminal Name	Description
R,S,T	AC Power Input Terminal	Connect commercial power 3 phase 220/50Hz
U,V,W	Inverter Output Terminal	Connect 3-phase induction motor
E	Grounding Terminal	Grounding terminal of inverter chassis
P,PR	Breaking Resistor Connection Terminal	if you mount the optional resistor connect it to this terminal

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การต่อ Control Circuit Connection

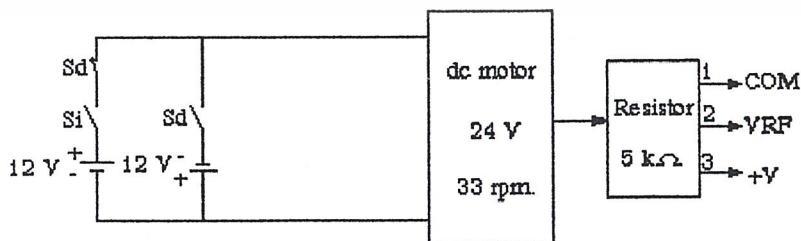


รูป 48 Terminal Connection Diagram of Control Circuit

ในการต่อใช้งาน Terminal control ของ Inverter ในการควบคุมรถไฟฟ้า AC เราจะต่อเฉพาะ Terminal ดังนี้

- 1.) +V, COM, VRF ซึ่งจะเป็นชุดควบคุมความถี่ของอินเวอร์เตอร์
- 2.) FR, RR เป็นชุดควบคุมการขับเคลื่อนของรถไฟฟ้า AC CAR ในการเดินหน้าและถอยหลัง ตามลำดับ
- 3.) MBS เป็นชุดตัดวงจรไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ Induction Motor ในขณะที่ทำการเบรค
- 4.) ES จะทำการ short circuit จากภายในอินเวอร์เตอร์

4. ชุดปรับความถี่ของ Inverter



รูป 49 วงจรการต่อชุดปรับความถี่ของ Inverter

Si : Foot Switch สำหรับการปรับเพิ่มความถี่ Inverter (ปรับเพิ่มความถี่ของรถ)
 Sd : Foot Switch สำหรับการปรับลดความถี่ของ Inverter (ปรับลดความถี่ของรถ)

3.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า(Generator) ที่นำมาประยุกต์ใช้ ชาร์จแบตเตอรี่

ได้นำ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า(Generator) เป็นแหล่งจ่ายไฟชาร์จแบตเตอรี่ โดยมีเครื่องย่นต์เอนกประสงค์เป็นตัวขับ ซึ่งไฟฟ้าที่ได้จาก Generator เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ และแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้ Bridge rectifier เพื่อชาร์จแบตเตอรี่แต่ต้องตั้งค่าของความเร็วเครื่องย่นต์เอนกประสงค์ให้จ่ายค่าแรงดันออกมาซึ่งสามารถคำนวณ ได้ดังนี้

Battery 1 ตัวมีขนาด . 12 V 6 Cell 24 Ahr

Normal charge = $2.25 \times 6 = 13.5$ V/ Battery 1 ตัว

Equalizing charge = $2.35 \times 6 = 14.1$ V/Battery 1 ตัว

คำนวณ จำนวน Battery ที่ใช้

$$\begin{aligned} V_{AC} &= 220 \text{ V}_{rms} \\ &= 220 \times \sqrt{2} \text{ V}_{peak} \\ &= 311 \text{ V}_{peak} \end{aligned}$$

ได้จำนวน Battery ทั้งหมดที่ใช้ = $311/12 = 26$ ลูก

Normal charge = $351 \text{ V}_{DC} = 248 \text{ V}_{AC}$

Equalizing charge = $366.6 \text{ V}_{DC} = 259 \text{ V}_{AC}$

การคำนวณหาค่า C Filter

$$C = \frac{1}{2\sqrt{3} f \cdot r \cdot R_L}$$

โดย f (ความถี่) = 100Hz

r (ripple voltage) = 10%

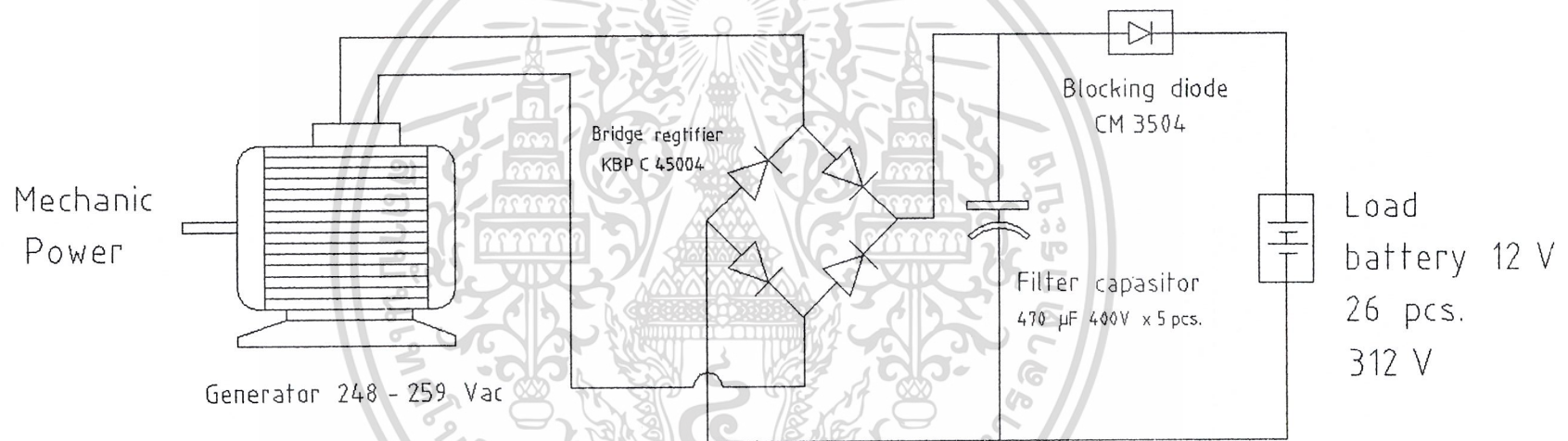
$R_L = V/I = 312/24 = 13 \Omega$

$$\text{จะได้ } C = \frac{1}{2\sqrt{3} \times 100 \times 0.1 \times 13} = 2.22 \text{ mF}$$

∴ เลือกใช้ C ขนาด 470 μF 400V 5 ตัว

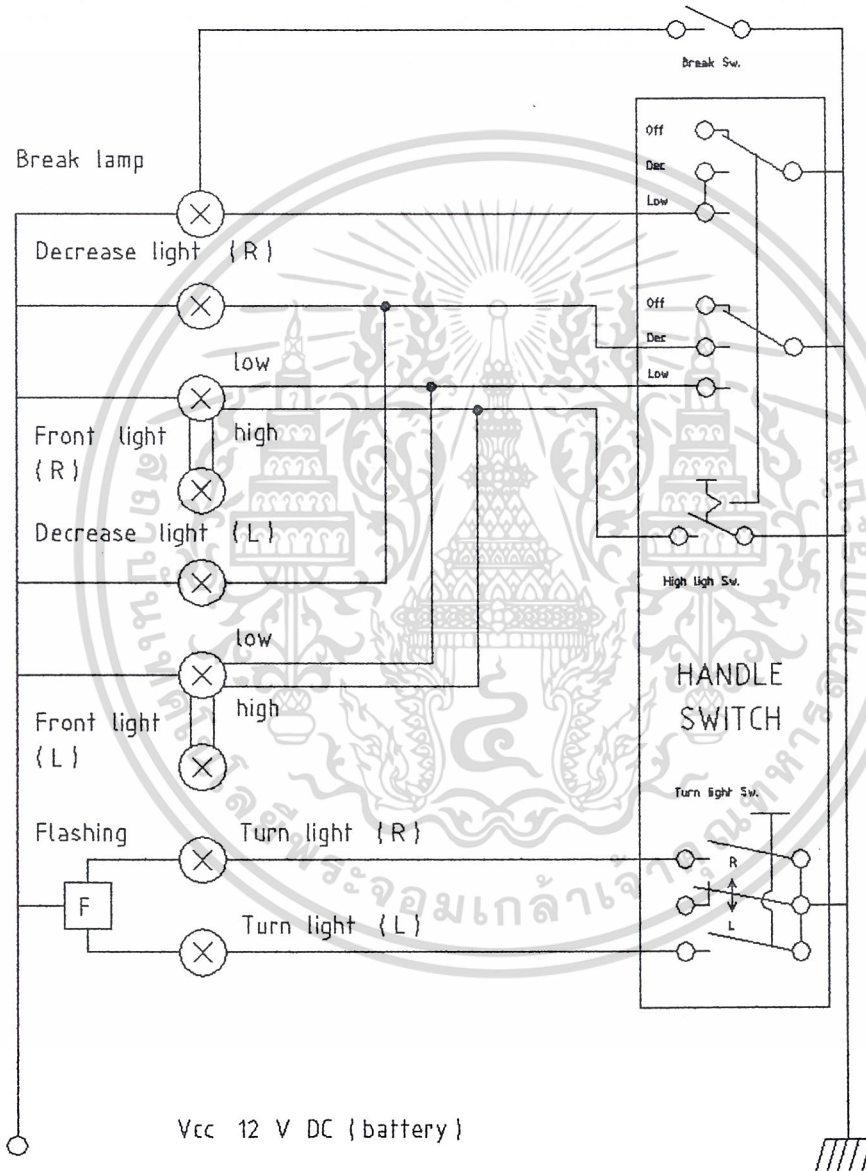
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 50 วงจรการชาร์จแบตเตอรี่โดยใช้ Generator ภายในรถไฟฟ้า AC



3.5 วงจรไฟฟ้ารถยนต์

ในรถไฟฟ้า AC นี้ได้มีการต่อวงจรไฟฟ้าภายในรถดังรูป 51



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูป 51 แสดงวงจรไฟฟ้าในรถไฟฟ้า AC
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 ทดสอบความสามารถในการควบคุมความเร็ว Induction Motor โดย Inverter

4.1.1 วัตถุประสงค์

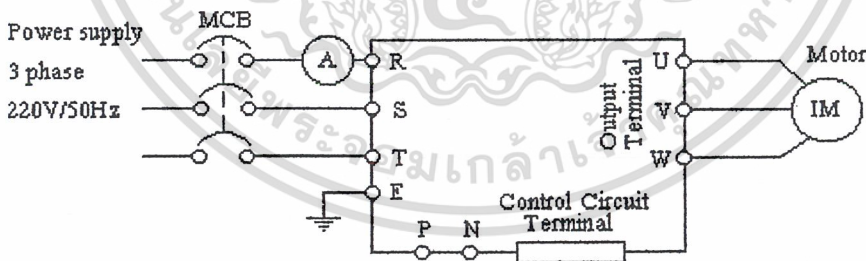
เพื่อทดสอบความสามารถในการควบคุมความเร็วของ Induction Motor โดยใช้ Inverter

4.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1.) Inverter ของ ERIC – 5001 SERIES ขนาด 10 Hp
- 2.) Induction Motor ขนาด 5.5 kW 7.5 Hp 3
- 3.) Ammeter ac 0-30 A
- 4.) Tacho meter
- 5.) Power supply 3 ϕ 220 V 50Hz

4.1.3 ขั้นตอนการทดลอง

- 1.) ค่อวงจรตามรูป



รูป 52 วงจรการทดลองใช้ Inverter ควบคุมความเร็ว Induction Motor

- 2.) ดูความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความเร็วรอบของ Motor
- 3.) เก็บข้อมูลค่ากระแสที่อ่านได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 บันทึกรผลการทดลอง

ตาราง 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของมอเตอร์, กระแสและความถี่ของอินเวอร์เตอร์

ความถี่(Hz)	กระแส(A)	ความเร็วรอบ(rpm.)
10	7	598.5
20	8	1195
30	5.5	1792
40	5	2390
50	5.4	2986
60	6.4	3575

4.2 การทดสอบการทำงานของระบบขับเคลื่อน

4.2.1 วัตถุประสงค์

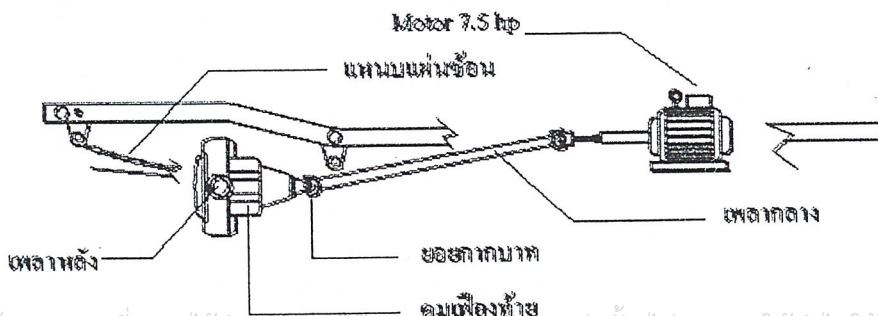
เพื่อทดสอบสภาพของระบบขับเคลื่อนก่อนทำการประกอบ โครงสร้างต่างๆ ของรถ

4.2.2 อุปกรณ์การทดลอง

- 1.) โครงแชสซีรถ
- 2.) Induction Motor
- 3.) Inverter
- 4.) Power supply 3 phase 220V 50Hz

4.2.3 ขั้นตอนการทดลอง

- 1.) ต่อ Power supply ให้กับ Inverter
- 2.) ต่อเอาต์พุตของ Inverter ให้กับ Motor
- 3.) ติดตั้งระบบขับเคลื่อนดังรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูป 53 แสดงการติดตั้งระบบขับเคลื่อนระหว่างโครงสร้างของรถกับMotor

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นที่มีเหตุพิเศษและต้องขออนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 ผลการทดลอง

จากการทดลองการขับเคลื่อนของโครงสร้างแชสซีส ทำให้เราทราบถึงอาการในการหมุนของเพลากลางของตัวโครงแชสซีส ซึ่งในการทดสอบครั้งแรกพบว่าแกนเพลากลางของโครงแชสซีสกับเพลาของ Motor ไม่ได้ศูนย์ จึงนำมาทำการแก้ไข หลังจากนั้นนำมาทำการทดสอบอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งได้ผลการทดสอบเป็นที่น่าพอใจ แล้วจึงดำเนินการในขั้นตอนต่อไป

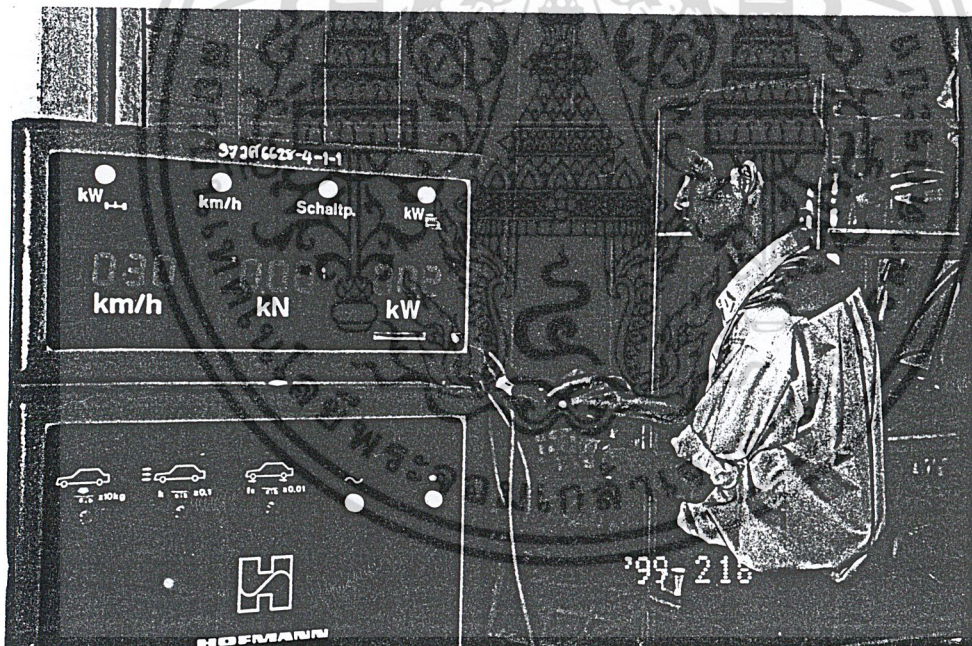
4.3 การทดสอบการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าในขณะ No-load

4.3.1 วัตถุประสงค์

เพื่อทดสอบความสามารถของการขับเคลื่อนรถไฟฟ้านำไปใช้งาน

4.3.2 อุปกรณ์การทดลอง

- 1) เครื่อง Chassis Dynamometer
- 2) รถไฟฟ้า AC



รูป 54 การทดสอบการขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าด้วยเครื่อง Chassis Dynamometer

4.3.3 ขั้นตอนการทดลอง

- 1) นำรถไฟฟ้าไปที่เครื่อง Chassis Dynamometer (ทดสอบที่ภาคเครื่องกล)
- 2) เพิ่มความเร็วรถไฟฟ้าครั้งละ 10 Hz
- 3) อ่านค่ากระแส โวลต์ ความเร็วรถ ทีแต่ละความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงได้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4 ผลการทดลอง

ตาราง 6 ผลการทดลองขณะ No-load

ความถี่(Hz)	กระแส(Adc)	แรงดัน(Vdc)	ความเร็วรถ(km/hr)
10	2.22	310	9
20	4.8	302	18
30	7.2	295	28
40	9.2	289	37
50	11	285	47

4.3.5 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วของรถจนถึง 50 Hz จะทำให้ไฟจากแบตเตอรี่ตกลงมาก เมื่อทำการวิ่งที่ความถี่นี้ต่อเนื่องจะทำให้แบตเตอรี่ไม่สามารถจ่ายไฟให้กับ Inverter ได้ Inverter จะทำการตัดวงจรซึ่งที่ monitor จะแสดง function -OP- โดยความหมายดูได้จากภาคผนวก

4.4 การทดสอบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าในขณะที่เพิ่ม Load

4.4.1 วัตถุประสงค์

เพื่อทดสอบสมรรถนะของรถไฟฟ้า

4.4.2 อุปกรณ์การทดลอง

- 1) เครื่อง Chassis Dynamometer
- 2) รถไฟฟ้า AC
- 3) Power Supply 220V 50Hz

4.4.3 ขั้นตอนการทดลอง

- 1) เพิ่มความเร็วรถไฟฟ้าไว้ที่ 50 , 55 , 60 Hz.
- 2) เพิ่ม Load ให้กับเครื่องทดสอบ
- 3) อ่านค่าที่ได้จากเครื่อง Chassis Dynamometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4 ผลการทดลอง

ตาราง 7 ผลการทดลองขณะเพิ่ม Load

ความถี่(Hz)	ความเร็วรถ(km/hr)	แรง(kN)	กำลัง(kW)
50	43	0.38	4.5
55	46	0.39	5
60	48	0.39	5.5

4.4.5 สรุปผลการทดลอง

ในการทดลองจำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายจากภายนอก เพื่อทำการทดสอบหาพิกัดกำลังสูงสุดของรถไฟฟ้า เนื่องจากแบตเตอรี่เริ่มเสื่อมสภาพ ทำให้ไม่สามารถจ่ายไฟให้กับรถไฟฟ้าที่ความเร็วสูงสุดได้จากผลการทดลองทำให้ทราบสมรรถนะของรถไฟฟ้าคันนี้ สามารถดูได้จากภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทวิจารณ์และสรุป

เนื่องจากโครงการนี้ เป็นโครงการที่ได้มีการพัฒนาจากโครงการครั้งที่แล้วที่ได้จัดทำขึ้นในปี พ.ศ. 2539

5.1 ปัญหาและการแก้ไขปรับปรุง ซึ่งในการทำโครงการครั้งนี้ได้พบปัญหาที่มีอยู่เดิมดังนี้

1. ฐานรองมอเตอร์และเพลากลาง
2. พวงมาลัยของรถ
3. การออกตัวของรถ
4. การสั่นและเสียงรบกวนของเครื่องยนต์อนุกรมประสงค์

จากปัญหาเดิมที่กล่าวมาข้างต้นนั้น ได้มีการแก้ไขปรับปรุงดังนี้คือ

1. ฐานรองมอเตอร์และเพลากลาง
 - ฐานรองมอเตอร์ เนื่องจากฐานรองมอเตอร์เดิมมีระดับต่ำไปเวลารถวิ่งขึ้นเนินฐานรองมอเตอร์จะกระแทกกับเนิน ดังนั้นจึงต้องรื้อฐานเดิมออก ทำการตัดเหล็กเชื่อมฐานใหม่ วัดระดับให้มีระดับเท่ากับแนวแชสซี (Chassis) ด้านหน้าของรถ
 - เพลากลาง เนื่องจากได้ทำฐานรองมอเตอร์ใหม่จึงทำให้ขนาดของเพลากลางเดิมเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงได้ทำการตัดต่อเพลากลางใหม่และเชื่อมกลึงให้ได้ศูนย์ ทั้งนี้รวมถึงเพลากลางของมอเตอร์ด้วย
 - โครงแชสซีสตรอมมีความสกรปรกเป็นสนิมและมีความผิวด จึงได้มีการขัดสนิมออกและใช้สเปรย์ฉีดพ่นกันสนิมจากนั้นทำการทาสีกันสนิมให้ทั่วโครงรถ
2. พวงมาลัยได้มีการทำการเปลี่ยนยางคัปปลิง (Coupling) ของพวงมาลัยให้ยืดหยุ่นมากขึ้น ส่วนขอยกขาของพวงมาลัยได้ใช้น้ำมันหล่อลื่นโซโกลม
3. การออกตัวของรถ เนื่องจากเดิมนั้นเพลากลางของมอเตอร์ไม่ได้ศูนย์และได้ทำการทดสอบแล้วพบว่าเพลากลางซึ่งต่อกับเพลากลางของมอเตอร์โดยตรงมีการเหวี่ยงแรงมากทำให้การส่งกำลังไม่ดี ซึ่งหลังจากที่ได้มีการปรับปรุงแก้ไขฐานรองมอเตอร์และเพลากลางรวมถึงเพลากลางของมอเตอร์ไปแล้วนั้นทำให้ประสิทธิภาพในการส่งกำลังดีขึ้นเป็นผลให้การออกตัวของรถดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การสั่นและเสียงรบกวนของเครื่องยนต์เอนกประสงค์ ปัญหาดังกล่าวนี้เป็นสิ่งที่ย่อมจะเกิดขึ้น โดยไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ซึ่งสามารถทำได้แค่เพียงการยึดเครื่องยนต์เอนกประสงค์ให้แน่นกับตัวรถเท่านั้น

ปัญหาที่เกิดขึ้นภายหลังจากการพัฒนารถไฟฟ้า

1. แหล่งจ่ายไฟ(แบตเตอรี่)

- แบตเตอรี่มีการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งาน ทำให้ประสิทธิภาพการจ่ายไฟขณะมีโหลดลดลงเร็วกว่าปกติ

2. ตัวถังของรถไฟฟ้า

- ตัวถังของรถมีการเสื่อมสภาพตามกาลเวลา เนื่องจากองค์ประกอบของโครงสร้างบางส่วนเป็นไม้อัดและกระดาษอัด ซึ่งเมื่อได้รับความชื้นกอบกับตากแดดและตากฝนจึงทำให้ผุพัง และในบางส่วนยังได้รับความเสียหายจากปลวกอีกด้วย ทำให้เมื่อเปิดแอร์มีการเก็บความเย็นได้ไม่ดีเท่าที่ควร และมีการรั่วซึมตามรอยต่อของรถ เช่น ประตูรถปิดไม่สนิท

2. ระบบเบรค

- ระบบเบรคไฮดรอลิกมีการรั่วในส่วนของการเชื่อมต่อ(joint) ทำให้ประสิทธิภาพในการเบรคลดลง ซึ่งได้ทำการซ่อมแซมตรงส่วนที่เกิดปัญหาแล้ว แต่ยังคงมีการรั่วซึมเล็กน้อย

5.2 สรุป

การพัฒนารถไฟฟ้า AC นี้ ได้เพิ่มสมรรถนะของรถให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น แต่ก็ยังคงมีข้อบกพร่องบางส่วนหลงเหลืออยู่บ้าง คือ

- ความไม่สะดวกในการสตาร์ทเครื่องยนต์เอนกประสงค์เพื่อเปิดแอร์และปั่นเจเนอเรเตอร์ในการจ่ายไฟเพื่อชาร์จเข้าแบตเตอรี่ เนื่องจากเครื่องยนต์เอนกประสงค์ถูกติดตั้งในส่วนหน้าของตัวรถ ซึ่งต้องใช้การดึงเชือกเพื่อสตาร์ทเครื่อง
- ตัวถังช่วงล่างไม่ได้ปิดมิดชิด หากโดนน้ำอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น มอเตอร์, โวลท์และแอมป์มิเตอร์ตรงแผงคอนโทรล อาจได้รับความเสียหายได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปรายละเอียดของรถไฟฟ้า AC

3 ϕ INDUCTION MOTOR 5.5 kW 7.5 Hp Δ 220V 20.11A 50 Hz pf 0.88 2 Pole

1 ϕ GENERATOR 2 kVA 220 V 4.5 A 50 Hz 1500 rpm

INVERTER รุ่น ERIC-5001 SERIES ขนาด 10 Hp

เครื่องยนต์เอนกประสงค์ ยี่ห้อ KAWASAKI รุ่น FG 230 6 Hp 1500 rpm

BATTERY 12V 24 Ah จำนวน 26 ลูก

ระบบชาร์จไฟ — ต่อกับไฟฟ้า 220 V_{AC} ใช้เวลาชาร์จ 14 ชั่วโมง

— เครื่องยนต์เอนกประสงค์ ความจุน้ำมัน 2 ลิตร

ใช้เวลาชาร์จ 2 ชั่วโมงสำหรับเวลาฉุกเฉิน

ความเร็วสูงสุด 47 กิโลเมตร/ชั่วโมง ที่ พิกัด 50 Hz

เวลาเริ่ม START จนถึงความเร็วสูงสุดใช้เวลา 50 วินาที

ระยะเวลาในการใช้งาน 1 ชั่วโมงต่อเนื่อง ที่พิกัด 50 Hz

อัตราทดเฟืองท้าย 4

มิติตัวรถ กว้าง×ยาว×สูง 1560×3780×1440 มิลลิเมตร

ฐานล้อ 2290 มิลลิเมตร

ช่วงล่างหน้า/หลัง 1230 / 1180 มิลลิเมตร

น้ำหนักรถ 800 กิโลกรัม

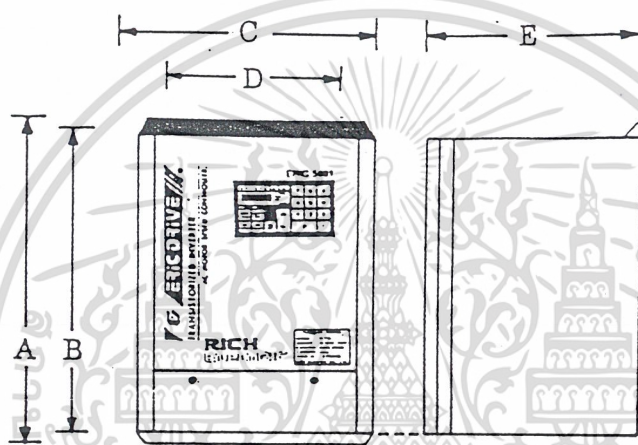
น้ำหนักบรรทุก(ไม่รวมแบตเตอรี่) 300 กิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ก. ขนาดของอินเวอร์เตอร์(Inverter)

อินเวอร์เตอร์ที่ใช้คือ ERIC-5001 SERIES Type 10L พิกัด 3 phase, 200-230 V., 34 A., 7.5kW มีขนาด(dimension) ดังรูป 55

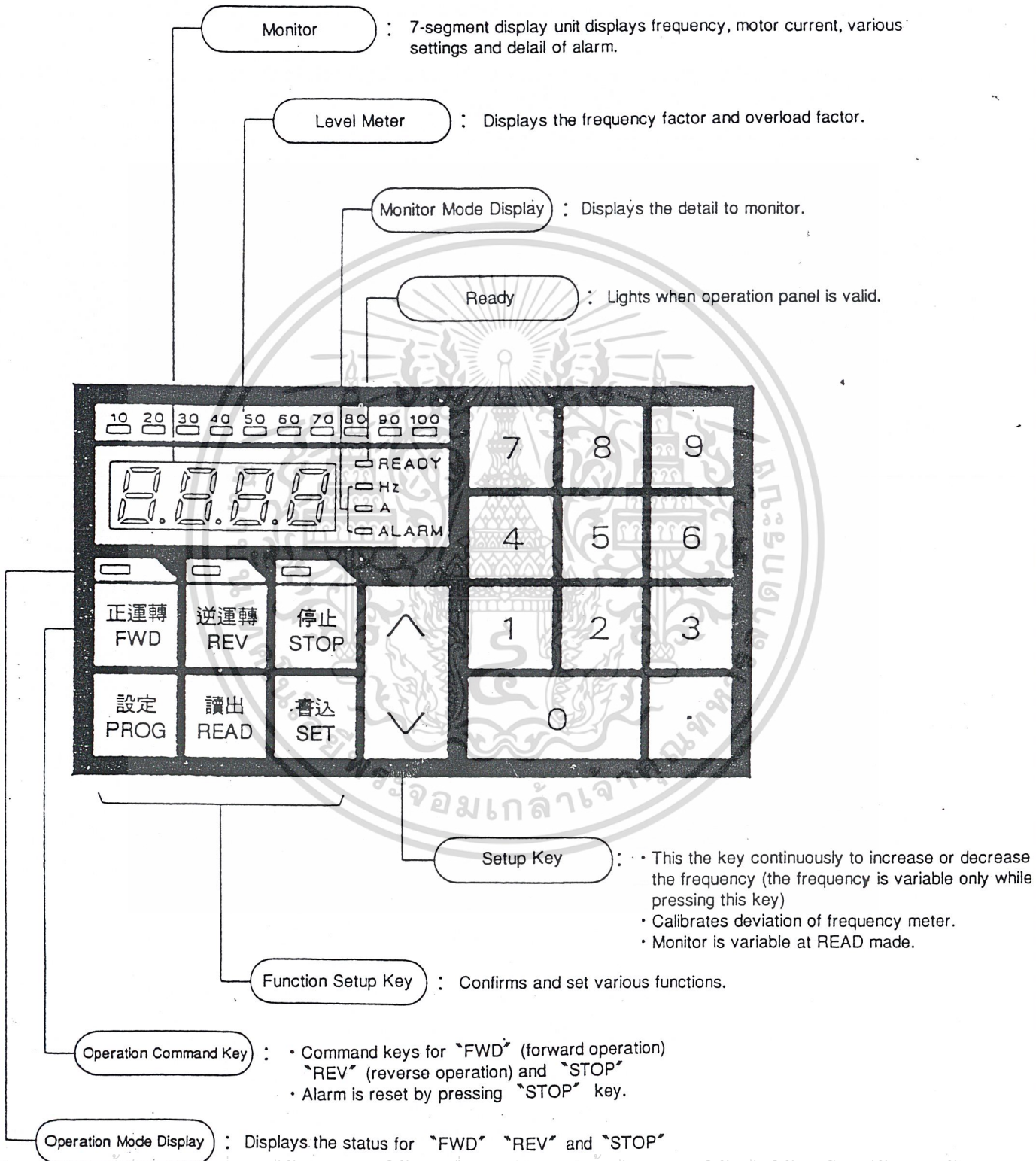


Dimension					
A	B	C	D	E	F
445	425	275	200	215	205

รูป 55 แสดง Dimension ของอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. จอแสดงผล (Operation Panel)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูป 56 จอแสดงผล (Operation Panel)
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค. รหัสคำสั่งการทำงาน

ตาราง 8 รหัสคำสั่งการทำงาน

Code No.	Function	Detail of Data	Data at Time of shipment
00	Set frequency	Frequency (Hz)	0
01	Select setting procedure of frequency	0 : Set operation panel 1 : Set external analogue signal 2: BCD code setting 3: Twenty code setting	0
02	Select monitor display data(7-segment)	0 : Frequency (Hz) 1: Current (A) 2 : Speed (rpm)	0
03	Select display data of level meter	0 : Output frequency (%) 1 : Overload factor (%)	0
04	Select operation command	0 : operation panel 1 : external signal	0
05	Select V/F pattern	1~28	2
06	Select torque boost	0 : Auto boots 1~25 : 100 (%)	5
07	Electronic thermal relay	0 : Function absent 1~25 : 100 (%)	100
08	Set 1st acceleration time	0.1~9999 sec./50 Hz	5
09	Set 1st deceleration time	0.1~9999 sec./50 Hz	5
10	Set 2nd acceleration time	0.1~9999 sec./50 Hz	10
11	Set 2nd deceleration time	Frequency (Hz)	10
12	Set 2nd frequency	Frequency (Hz)	20
13	Set 3rd frequency	Frequency (Hz)	30
14	Set 4th frequency	Frequency (Hz)	40
15	Set jogging frequency	Frequency (Hz)	5
16	Set start frequency	0.5~50 Hz	0.5
17	Set upper limiter of frequency	Frequency (Hz)	60
18	Set lower limiter of frequency	Frequency (Hz)	0
19	Set frequency bias	Frequency (Hz)	0
20	Set jump frequency 1.	Frequency (Hz)	0

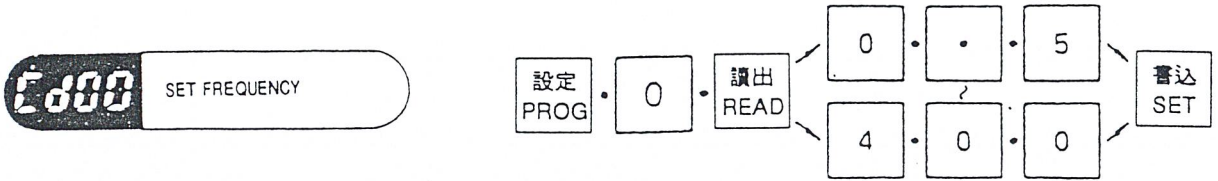
Code No.	Function	Detail of Data	Data at Time of Shipment
21	Set jump frequency 2.	Frequency (Hz)	0
22	Set jump frequency 3.	Frequency (Hz)	0
23	Set jump frequency 4.	Frequency (Hz)	0
24	Set jump frequency 5.	Frequency (Hz)	0
25	Set DC braking rate	0 : Break absent 1~7 : Breaking	0
26	Set DC braking time	1~200 sec.	1
27	Max. frequency limiter	0 : Limiter absent 1 : 120 Hz limit	1
28	Select overcurrent stall mode	0 : Stall absent 1 : Chang at 2 times acceleration time or 4 times deceleration time. 2 : Chang at 4 times acceleration time or 2 times deceleration time. 3 : Frequency without Change or change deceleration time	0
29	Select stall preventive function	0 : Only at acceleration time 1 : Only at steady time 2 : At acceleration time and steady time	0
30	Restart function during free run	0 : Function absent 1 : Function present	0
31	Calibrate deviation of frequency meter	0 : Normal mode 1 : Calibration mode	0
32	Automatic alarm reset function	0 : Function absent 1 : Function present	0
33	Alarm signal output at power interruption	0 : Alarm relay not activate 1 : Alarm relay activate	0
34	Select acceleration/deceleration mode	0 : Linear change	0
35	Select remote-local control of input function for operation panel	0 : Function moves to other	-
36	Initialize data	1 : Turn to the data at the time of shipment	-
37	Motor responsive function of electronic thermal relay	0 : Universal motor 1 : Specialized motor for inverter	0
38	Select braking resistor	1 : Use of optional resistor	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Code No.	Function	Detail of Data	Data at Time of Shipment
39	Function to fix motor running direction	0 : Both forward/reverse capable	
		1 : Forward only capable	0
		2 : Reverse only capable	
40	Function to lock data	0 : Data change capable	0
		1 : Data not change capable	
41	Stop signal in panel during operation with external signal	0 : Stop not available	1
		1 : Stop available	
Code No.	Function	Detail of Data	Data at Time of shipment
42	Select frequency gain	20%~200%	100
43	Select to restart after short time input failer no connection with code No.40 data	0: Restart not available 1 : Restart available(same as item No. 30) 2 : restart available(restart from start-frequency)	0
44	Ratio of speed	0.01~500	1
45	Polarity of bias	0 : Positive 1 : Negative	0
46	Latest trouble	OC-A -PO- -Fb- bUoH	nOnE
47	Second last trouble	OC-d -OH- *-OE-	
48	Third last trouble	OC-n -OL-E-	
49	Fourth last trouble	Oc-s -OL-	
50	Reset trouble memory	1:Reset abnormal memory	
51	Select each alarm signal with auto reset condition	0 : Output not provided 1 : Output provided	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง. ฟังก์ชันที่ทำการแก้ไข



- The function to set frequency by code. Especially, when the monitor displays current (Cd02-1), this code can command the frequency.
- Settable range of frequency is 0.5 ~ 400Hz.

Note: However, it cannot set the frequency if setting procedure of frequency selects the external analogue signal (Cd01-1).



- This is the function to select operation panel or external analogue signal to set the output frequency of inverter..

Cd01-0: Set frequency on operation panel.

Cd01-1: Set frequency by external analogue signal (4 ~ 20mA, 0 ~ 10V, etc.)



- The function to select the monitor display data.

Cd02-0: Display the frequency (Hz).

Cd02-1: Display the current (A).



- The function to select operation panel or external signal to perform the inverter operation.

Cd04-0: Operation on operation panel.

Cd04-1: Operation by external signal.

รูป 57 แสดงการโปรแกรมอินเวอร์เตอร์ที่มอนิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จ. ฟังก์ชันการป้องกัน (Protective Function)

ตาราง 9 แสดงฟังก์ชันการป้องกันของอินเวอร์เตอร์

Error Display	Trouble	Checkpoint	Solution
Err	Erroneous operation	<ul style="list-style-type: none"> Check if operation was made according to Instruction Manual. 	<ul style="list-style-type: none"> Operate in correct procedure
Er-0	Malfunction of internal ROM or RAM	<ul style="list-style-type: none"> Turn OFF the power and turn it ON again after CHarge lamp goes out. 	<ul style="list-style-type: none"> Replace the unit.
Er-1	Malfunction of Internal CPU	<ul style="list-style-type: none"> External noise may be too large. 	<ul style="list-style-type: none"> Attach contact absorber. Attach noise filler.
OC-A	Detect overcurrent during acceleration (detect at 180% of unit rated current).	<ul style="list-style-type: none"> It may be in quick acceleration. 	<ul style="list-style-type: none"> Make acceleration time longer.
OC-B	Detect overcurrent during deceleration (detect at 180% of unit rated current).	<ul style="list-style-type: none"> It may be in quick deceleration. 	<ul style="list-style-type: none"> Make deceleration time longer.
OC-n	Detect overcurrent during steady state operation (detect at 180% of unit rated current).	<ul style="list-style-type: none"> There may be quick change of load. 	<ul style="list-style-type: none"> Eliminate quick change of load
OC-S	Detect output short-circuit or grounding (detect at 270% of unit rated current).	<ul style="list-style-type: none"> Is there not short-circuit of output or grounding of motor? 	<ul style="list-style-type: none"> Check up terminal and check motor with megger.
-OE-	DC overvoltage H Class (detect at DC voltage 800V). (L Class detect at DC Voltage 400 V)	<ul style="list-style-type: none"> It may be in quick deceleration or in operation at large minus load. 	<ul style="list-style-type: none"> Make deceleration time setting longer. Consider to use the external braking resistor (optional).
-UV-	Detect undervoltage by power interruption or instantaneous interruption H Class (detect it at DC Voltage 400V). L Class detect at DC Voltage 200 V).	<ul style="list-style-type: none"> Conditions for power supply and voltage satisfactory? Voltage drop? 	<ul style="list-style-type: none"> Recover the power supply. Improve the power supply conditions.
-OH-	Detect overheating of cooling fan.	<ul style="list-style-type: none"> Cooling fan stop? (In case of 7.5 KW, 15KW) Ambient temperature may be too high. Operation at overload? 	<ul style="list-style-type: none"> Replace cooling fan. Lower the ambient temperature. Check up the load conditions.
OL-E	Detect motor overheating (thermal relay for motor).	<ul style="list-style-type: none"> Motor may be overloaded. 	<ul style="list-style-type: none"> Reduce the load. Increase capacity of inverter and motor.
-OL-	Detect inverter overload (detect at 150% of setting by electronic thermal relay for 1 min).		
Fb	Fuse is blown out	<ul style="list-style-type: none"> Check the fuse and transistor 	<ul style="list-style-type: none"> Replace the fuse and transistor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Symptom		Possible Cause	Solution
Motor does not run.	Motor does not run.	Power properly supplied to power terminals R, S and T?	<ul style="list-style-type: none"> Supply the power. Turn OFF the power once and supply it again.
		Wiring made wrong?	<ul style="list-style-type: none"> Perform wiring correctly.
		Voltage output to the output terminals U, V and W?	<ul style="list-style-type: none"> Make sure of power supply.
		Motor locked?	<ul style="list-style-type: none"> Reduce the load.
		Protective function not activated?	<ul style="list-style-type: none"> Make sure of it by the monitor display
		How is setting on operation panel?	<ul style="list-style-type: none"> Confirm setting.
Tripping at motor start.	'OC-A' is displayed at motor start or at acceleration (overcurrent protective function activated).	Shortage of start torque due to heavy load.	<ul style="list-style-type: none"> Change torque boost value¹ (Cd06).
		Acceleration time is too short as compared with load GD2	<ul style="list-style-type: none"> Make acceleration time longer (Cd08, Cd10).
		Start frequency too low.	<ul style="list-style-type: none"> Make start frequency higher (Cd16).
		Inverter starts during free run of motor	<ul style="list-style-type: none"> Use restart function during free run (Cd30-1).
Tripping at motor deceleration.	'OE-' is displayed at deceleration time (overvoltage protective function activated).	Quick deceleration made load GD2 large and it cannot absorb regenerative energy. * Overvoltage protective function activates if DC voltage exceeds 800V for H Class or 400V FOR L Class by regenerative energy.	<ul style="list-style-type: none"> Make deceleration time longer (Cd09, Cd11). Use external braking resistor (optional).
Tripping during operation.	'PO-' is displayed during operation.	Power voltage drops.	<ul style="list-style-type: none"> Consider the capacity of power supply unit.
	'OE-' is displayed during operation.	Motor is driven to run from the load.	<ul style="list-style-type: none"> Use external braking resistor (optional).
	'OC-n' is displayed during operation.	There may be shock load, though quick load change may not occur.	<ul style="list-style-type: none"> Consider the capacity of inverter.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการเรื่องการพัฒนาารถไฟฟ้า AC นี้สำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาในการให้คำปรึกษา แนะนำและความช่วยเหลือในด้านต่างๆ จากท่านอาจารย์ดังนี้คือ

1. ศศ. ประภาส ไพรสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ
2. อ. พงษ์ศักดิ์ คำมุด อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องทดลอง Chassis

Dynamometer

จึงเรียนมาเพื่อขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. ปริญญาพันธ์, “รถไฟฟ้า AC”, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2. ดร. พีรศักดิ์ วรสุนทรโรตถ, “เทคนิคการซ่อมแซม เลือกประเภทและติดตั้งมอเตอร์เหนี่ยวนำ”, บ. ซีเอ็ด ยูเคชั่น จำกัด(มหาชน)
3. มงคล ทองสงคราม, “เครื่องกลไฟฟ้ากระแสสลับ”, มกราคม 2535
4. สมศักดิ์ สุโมตยกุล, “หลักการทํางานและเทคนิคการตรวจซ่อมเครื่องปรับอากาศชนิด”, 2538
5. อนันต์ คัมภีรานนท์, “อิเล็กทรอนิกส์อุตสาหกรรม I”, สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตนนทบุรี
6. Ned Mohan, “Power Electronics: Convertors Applications and Design”, John Wiley & Sons, Inc. 1989
7. Instruction Manual for ERIC – 5001 Series Rich Electric Co.,Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้