

โครงการรถไปฟ้าสำหรับคนพิการ
(ELECTRICAL WHEELCHAIR)



วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
คณะ วิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2533

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ปริญญาโท ประจำปีการศึกษา 2533

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

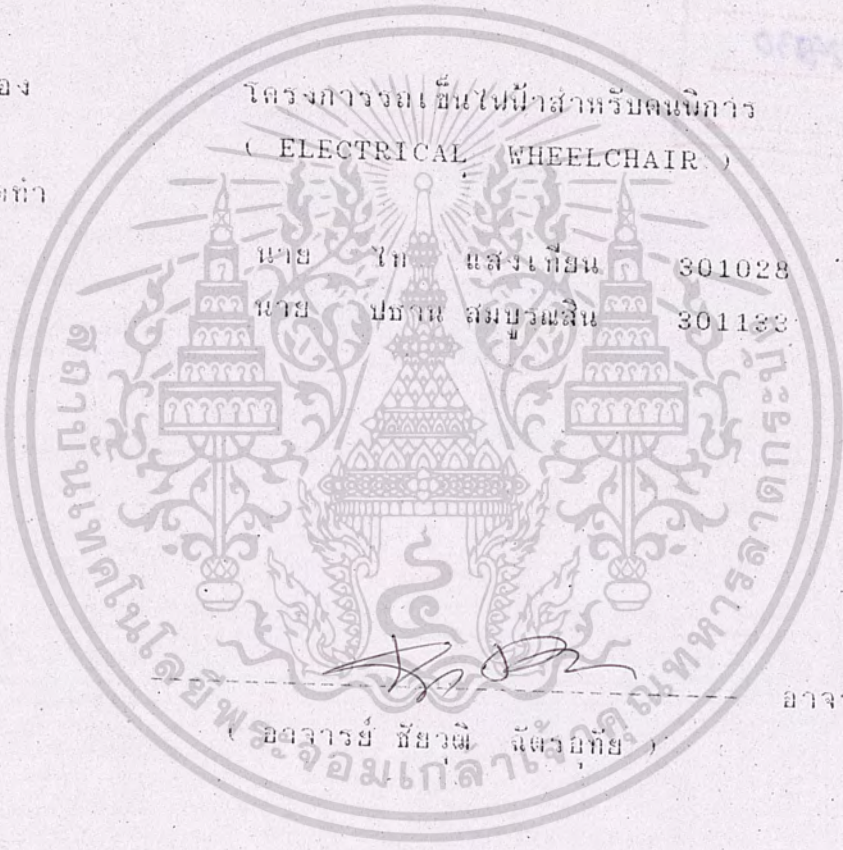
เรื่อง

โครงการรถเข็นไฟฟ้าสำหรับคนพิการ
(ELECTRICAL WHEELCHAIR)

ผู้จัดทำ

นาย ไพฑูริย์ แสงเทียน 301028

นาย ปณานต์ สมบุญสัน 301133



(Handwritten signature)

(อาจารย์ ชัยวุฒิ จิตพลกุล)

อาจารย์ที่ปรึกษา

รฟ.
๘๑๓

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางธุรกิจ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

028830

16.11.2533

ตำนาน

ในปัจจุบันนี้มีผู้ป่วย และคนพิการ เพิ่มขึ้นอย่างมาก คนพิการเหล่านี้จำเป็นต้องใช้รถเข็น เมื่อต้องการไปไหนมาไหน ซึ่งรถเข็นแบบที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้ ยังมีความสะดวกไม่เพียงพอ เพราะต้องให้ผู้อื่นช่วยเข็น หรือเมื่อต้องการเข็นเองก็ต้องใช้แรงมาก ซึ่งคนพิการบางคนไม่สามารถเข็นรถเองได้ จะเป็นการจำกัดโลกของคนพิการให้แคบลง

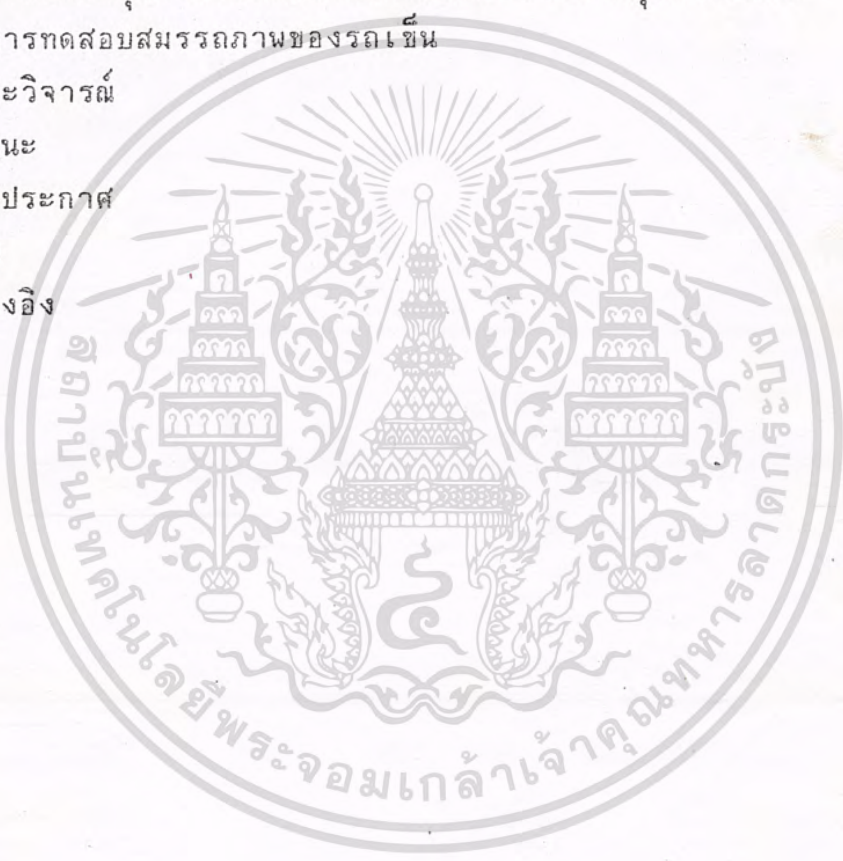
ข้าพเจ้าเล็งเห็นความสำคัญของคนพิการ จึงมีความคิดที่จะนำรถเข็นที่ใช้กันอยู่มาดัดแปลงให้มีความสะดวกและมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยนำระบบไฟฟ้ามาใช้ในกาขับเคลื่อนและควบคุม คนพิการจะสามารถบังคับให้รถเข็นเดินหน้าถอยหลัง เลี้ยวซ้ายและเลี้ยวขวาได้ รวมทั้งยังสามารถเพิ่มและลดความเร็วได้ด้วย ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อคนพิการ นอกจากนี้ยังประหยัดค่าใช้จ่ายเพราะใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงาน และในหารอัตโนมัติแต่ละครั้งจะสิ้นเปลืองเงินน้อยมาก เพื่อเทียบกับน้ำมัน

ข้าพเจ้าหวังว่ารถเข็นคนพิการที่ได้จัดทำนี้ คงจะเป็นประโยชน์ไม่มากนักน้อยแก่คนพิการและผู้ที่จะนำไปดัดแปลงให้สมารถใช้งานได้ยิ่งขึ้น

โท สรวงเทียน
ประธาน สโมสรมูลนิธิ

สารบัญ

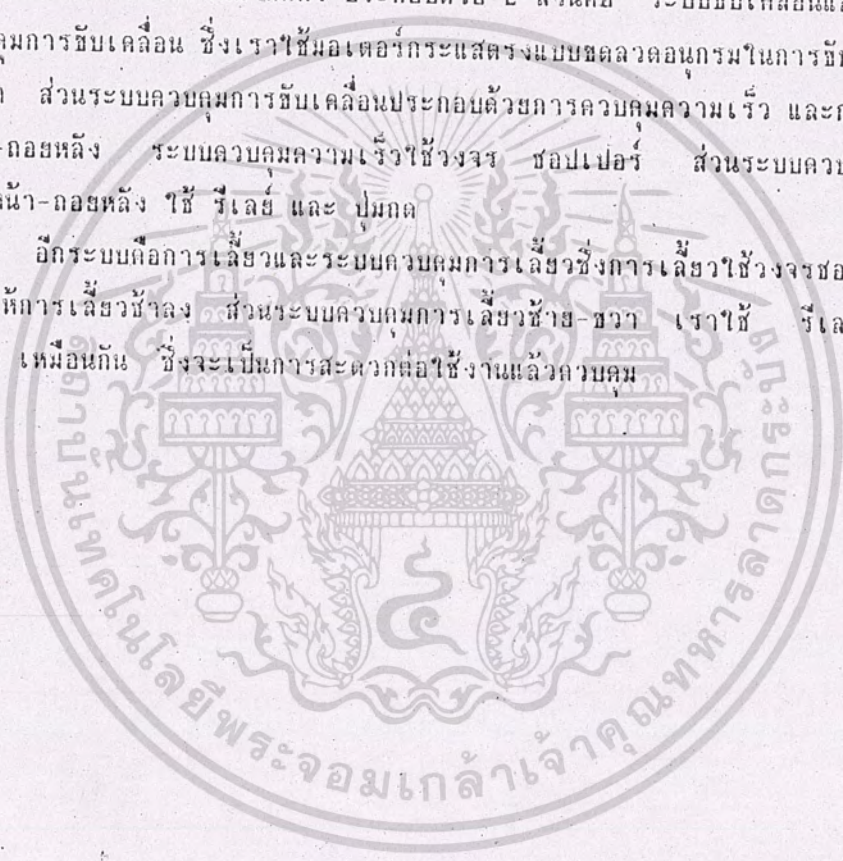
| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อ | 1 |
| บทที่ 1 ทฤษฎีมือเตอร์กระแสตรง | 3 |
| บทที่ 2 การออกแบบและการทดสอบมอเตอร์ | 32 |
| บทที่ 3 การออกแบบและตัดแปลงตัวรถ | 36 |
| บทที่ 4 การปรับความเร็ว | 37 |
| บทที่ 5 ระบบควบคุมการเดินหน้า-ถอยหลังและการควบคุมการเลี้ยว | 41 |
| บทที่ 6 การทดสอบสมรรถภาพของรถเข็น | 46 |
| บทสรุปและวิจารณ์ | 48 |
| ข้อเสนอแนะ | 49 |
| กิตติกรรมประกาศ | |
| ภาคผนวก | |
| หนังสืออ้างอิง | |



บทคัดย่อ

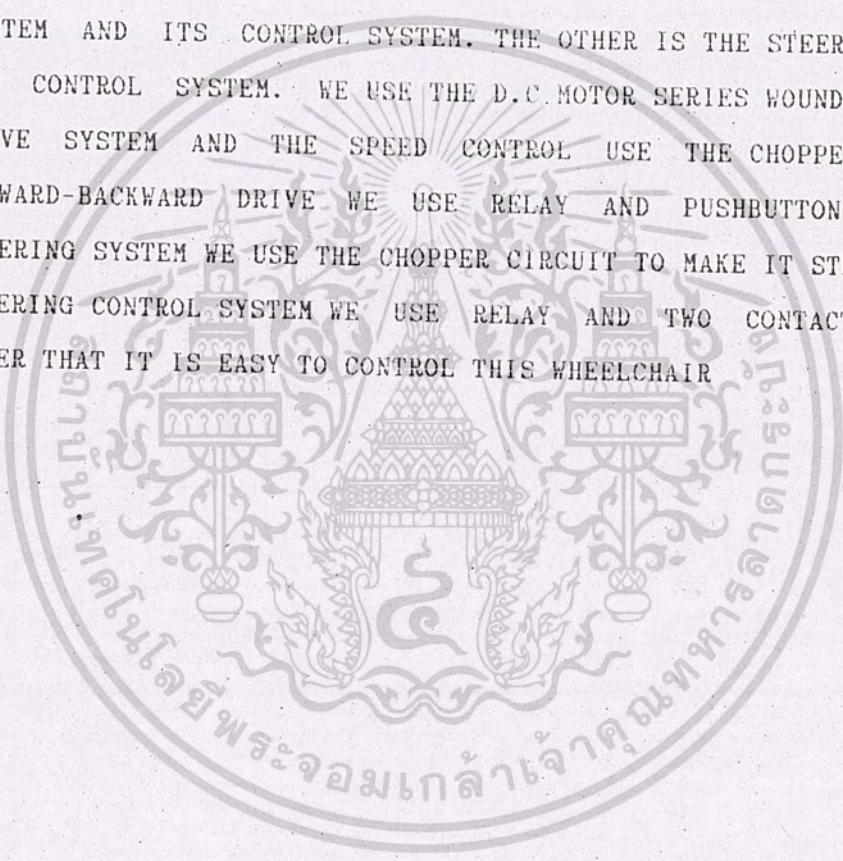
โครงการรถเดินไฟฟ้าสำหรับคนพิการนี้ จัดสร้างขึ้นเพื่อความสะดวกความสบายของคนพิการ โดยที่ไม่ต้องพึ่งพาผู้อื่น และผู้พิการสามารถควบคุมรถเดินได้ด้วยตัวเอง ซึ่งรถเดินไฟฟ้านี้มาติดตั้ง ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ระบบขับเคลื่อนและระบบควบคุมการขับเคลื่อน ซึ่งเราใช้มอเตอร์กระแสตรงแบบชดวตอนุกรมในการขับเคลื่อนตัวรถ ส่วนระบบควบคุมการขับเคลื่อนประกอบด้วย การควบคุมความเร็ว และการเดินหน้า-ถอยหลัง ระบบควบคุมความเร็วใช้วงจร ซอปเปอร์ ส่วนระบบควบคุมการเดินหน้า-ถอยหลัง ใช้ รีเลย์ และ ปุ่มกด

อีกระบบคือ การเลี้ยวและระบบควบคุมการเลี้ยวซึ่งการเลี้ยวใช้วงจรซอปเปอร์ เพื่อให้การเลี้ยวช้าลง ส่วนระบบควบคุมการเลี้ยวซ้าย-ขวา เราใช้ รีเลย์ และ ปุ่มกด เหมือนกัน ซึ่งจะเป็นการสะดวกต่อใช้งานแล้วควบคุม



ABSTRACT

THIS ELECTRICAL WHEELCHAIR PROJECT IS CONVENIENT FOR DISABLE MAN. HE CAN USE THIS WHEELCHAIR BY HIMSELF . THE ELECTRICAL SYSTEM THAT WE USE IN THIS WHEELCHAIR CONSIST OF TWO PART. ONE IS THE DRIVE SYSTEM AND ITS CONTROL SYSTEM. THE OTHER IS THE STEERING SYSTEM AND ITS CONTROL SYSTEM. WE USE THE D.C MOTOR SERIES WOUND TYPE FOR THE DRIVE SYSTEM AND THE SPEED CONTROL USE THE CHOPPER CIRCUIT. FOR FORWARD-BACKWARD DRIVE WE USE RELAY AND PUSHBUTTON AND FOR THE STEERING SYSTEM WE USE THE CHOPPER CIRCUIT TO MAKE IT STEER SLOWLY. THE STEERING CONTROL SYSTEM WE USE RELAY AND TWO CONTACT PUSHBUTTON AFTER THAT IT IS EASY TO CONTROL THIS WHEELCHAIR



บทที่ 1

ทฤษฎีมอเตอร์กระแสตรง (DIRECT CURRENT MOTORS)

1. หลักการของ MOTOR มอเตอร์ก็คือตัวเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงาน เพื่อนำพลังงานกลที่ได้ไปขับเคลื่อนสิ่งต่าง ๆ ตามที่ต้องการ อากาศทางกลที่เกิดขึ้นนี้ก็คือหลักการที่ว่า เมื่อมีกระแสไหลในตัวนำ ซึ่งอยู่ในสนามแม่เหล็กนั้น ย่อมทำให้เกิดแรงขึ้นในทิศทางที่หาได้จากกฎมือซ้ายของเฟลมมิ่ง ขนาดของแรงที่เกิดขึ้นหาได้จาก

$$F = Bil$$

เมื่อ F = แรงที่เกิดขึ้นบนตัวนำหนึ่งตัว

B = ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก

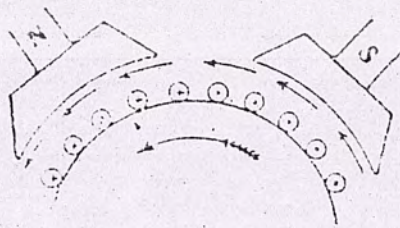
i = กระแสที่ไหลในตัวนำ

l = ความยาวของตัวนำ

แรง F ที่เกิดขึ้น จะอยู่ในแนวที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก และกระแสที่ไหลผ่านในตัวนำนั้น ๆ

เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรงนี้ โดยหลักการเช่นพื้นฐานของโครงสร้างของเครื่องกำเนิดไป และมอเตอร์นั้น ไม่มีความแตกต่างกันในโครงสร้างเลย นั่นก็คือเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรงเครื่องเดียวกันนี้ สามารถนำไปใช้งานสลับกันได้

มอเตอร์กระแสไฟตรงก็คล้ายกับ เครื่องกำเนิดกระแสไฟตรง นั่นก็คือ มีเครื่องแบบ shunt-wound หรือ series wound หรือ compound-wound เช่นกัน



รูป 1 หลักการของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามรูป 1 แสดงส่วนหนึ่งของมอเตอร์กระแสไฟตรง ที่มีหลายขั้วแม่เหล็กเมื่อใส่ไฟเข้าไปที่สนามกระตุ้น ย่อมทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กขึ้น ที่ขั้วแม่เหล็ก และ เมื่อป้อนกระแสให้ไหลผ่านในตัวนำที่อาร์มาเจอร์ ก็จะทำให้เกิดแรงขึ้นในตัวนำที่อยู่ในสนามแม่เหล็ก นั่นคือ ทำให้อาร์มาเจอร์หมุน ในที่นี้ได้กำหนดให้กระแสที่ไหลในตัวนำของอาร์มาเจอร์ที่อยู่ภายใต้ชั้นเหนือ N มีทิศของกระแสพุ่งเข้าไปข้างใน ดังหางลูกศรที่เป็นกากะบาด ส่วนตัวนำที่อยู่ภายใต้ชั้นใต้อันนี้ ให้กระแสพุ่งออกมาข้างนอกดังหัวลูกศรที่เป็นจุด เมื่อเป็นเช่นนี้ จึงหาทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวนำทุก ๆ ตัวที่อยู่ภายใต้ขั้วแม่เหล็กทั้ง N และ S ได้โดยใช้กฎมือซ้ายของเฟลมมิ่งวิธีหาทิศทางการมือซ้ายออก โดยให้นิ้วหัวแม่มือ นิ้วชี้และนิ้วกลางตั้งฉากซึ่งกันและกัน (ท่าแบบเดียวกับกฎมือขวาซึ่งใช้หาทิศแรงเคลื่อนไปที่เกิดขึ้น) จากนั้น ให้นิ้วชี้ชี้ไปตามทิศทางของสนามแม่เหล็ก คือชี้จากชั้น N ไป S ให้นิ้วกลางชี้ไปตามทิศทางการไหลของกระแส ณ ตัวนำที่ต้องการหาทิศทางการเคลื่อนที่นั้น ๆ นั่นคือ นิ้วหัวแม่มือจะชี้ทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวนำนั้น ๆ จะพบว่าแรงที่เกิดขึ้นบนตัวนำทุก ๆ ตัว ภายใต้ขั้วแม่เหล็กเดียวกัน จะมีทิศไปในทางเดียวกัน และจะอยู่ในแนวสัมผัสกับเส้นรอบวงของอาร์มาเจอร์นั้น ๆ และพบว่า แรงที่เกิดขึ้นภายใต้ขั้วแม่เหล็กทุก ๆ ขั้ว ที่สลับกันไปในั้น จะมีทิศทางไปทางเดียวกันทั้งสิ้น โดยแต่ละแรง จะอยู่ในแนวสัมผัสกับเส้นรอบวงของอาร์มาเจอร์ นั่นคือ ภายใต้ขั้วแม่เหล็กแต่ละขั้วก็จะเกิดแรงลัพธ์ขึ้นแรงหนึ่ง ฉะนั้นเมื่อมีหลายขั้วก็มีหลายแรง และทุก ๆ แรงต่างก็รวมกันเป็นแรงบิดขึ้นมาแรงหนึ่ง ดังนั้นจึงทำให้มอเตอร์หมุนไปได้จากแรงที่เกิดขึ้น

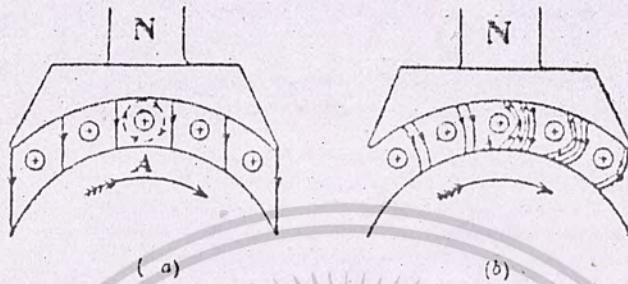
ข้อที่ควรสังเกตข้อหนึ่งคือ commutator เป็นตัวที่ทำหน้าที่เช่นเดียวกับที่ทำหน้าที่ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า นั่นคือ เป็นตัวทำให้กระแสไหลผ่านตัวนำไปในทิศทางเดียวตลอดเวลาภายใต้ขั้วแม่เหล็กแต่ละขั้ว ซึ่งช่วยทำให้เกิดแรงบิดไปในทิศทางเดียวกันอย่างต่อเนื่อง

2. การเปรียบเทียบอาภักปกริยาของเครื่องกำเนิดไฟ และมอเตอร์ (Comparision of Generator and Motor Action) ดังได้กล่าวมาแล้วในตอนต้นว่า เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรงเครื่องเดียวกันนี้ สามารถใช้เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าหรือเครื่องผลิตไฟฟ้าก็ได้ นั่นคือ เมื่อทำงานเป็นมอเตอร์นั้น ก็จำเป็นต้องใส่พลังงานไฟฟ้าเข้าไป เพื่อให้ได้พลังงานกลออกมาและเมื่อนำมาใช้งานเพื่อผลิตกระแสไฟนั้น ก็จำเป็นต้องใส่พลังงานกลเข้าไปขับให้ตัวหมุนเคลื่อนที่ เพื่อให้ได้พลังงานไฟออกมาตามที่ต้องการ

จากที่กล่าวมาแล้วข้างบนนี้ เราลองมาพิจารณากำหนดการทำงานของเครื่องผลิตไฟฟ้า ทำอย่างไร จึงทำให้เปลี่ยนพลังงานกลมาเป็นพลังงานไฟได้ ทั้งนี้เพื่อใช้เปรียบเทียบกับอาภักปกริยาของภายในอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่วากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามรูป 2.1 a แสดงให้เห็นเพียงส่วนหนึ่งของเครื่องผลิตไฟโดยการหมุนอาร์มาเจอร์ซึ่งมีตัวนำวิ่งผ่านสนามแม่เหล็กที่ขั้ว N หรือ ขั้ว S ก็ตาม แต่ในที่นี้ ได้ทำการพิจารณาเฉพาะตัวนำ A ที่อยู่บนอาร์มาเจอร์วิ่งผ่านขั้ว N ในทิศตามเข็มนาฬิกา จากกฎมือขวาของเฟลมมิ่ง ก็พบว่า มีแรงเคลื่อนไฟพุ่งเข้าไป ดังแสดงในรูป 2.1 a เมื่อเครื่องผลิตไฟจ่ายกระแสไฟออกไปให้กับภาระไฟฟ้า จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบ ๆ ตัวนำทุกตัว แต่ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะตัวนำ A เท่านั้น ดังนั้นเมื่ออาร์มาเจอร์ยังถูกขับให้หมุนไปทางเดิม (ตามเข็มนาฬิกา) โดยพลังงานกลภายนอกอยู่ด้วยกำลังแรงเท่าเดิมอยู่ ก็จะทำให้มีความรู้สึกว่าการเกิดไฟพุ่งเข้าไปเริ่มหมุนช้าลงไป ที่เป็นเช่นนี้เพราะมีแรงสวนแม่เหล็กไฟฟ้า (counter electromotive force) คอยต้านการเคลื่อนที่ของตัวขั้วนั่นเอง กริยา หรืออาการที่เกิดขึ้นเช่นนี้ สามารถมองเห็นได้ชัด หรือเข้าใจได้ง่ายดังรูป 2.1 b ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเส้นแรงทางด้านขวาของตัวนำ A อยู่ในทิศทางการเคลื่อนที่ของอาร์มาเจอร์นั้น มีจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กมากกว่าทางด้านซ้าย ทั้งนี้เพราะเส้นแรงแม่เหล็กที่ขั้วขั้วบนตัวนำ A ของทางขวามือนี้ ไปยึดหรือรวมกับเส้นแรงแม่เหล็กสำคัญ N ส่วนข้างซ้ายนี้จะไปแยกตัวกับแม่เหล็กหลัก และเห็นทางด้านซ้าย จึงมีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กน้อยกว่า การเกิดเส้นแรงแม่เหล็กบนตัวนำ A นี้ หาได้โดยการใช้นิ้วชี้ของมือขวา (Cork's Screw Rule) เพื่อให้ง่ายแก่การเข้าใจ จึงอาจเปรียบเทียบได้ว่า เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในกริยาอาการต่าง ๆ เหล่านี้ ต่างก็เปรียบเสมือนเส้นยาวหรือหนังสือที่ใช้นิ้วชี้ โดยมี A ซึ่งเป็นตัวนำนั้นเปรียบเสมือนว่าเป็นลูกหิน ฉะนั้นยังมีเส้นแรงเกิดขึ้นทางขวามากขึ้นเท่าไรก็จะทำให้เกิดแรงต้านเกิดขึ้นบนอาร์มาเจอร์มากขึ้น หรืออาจพูดว่าเมื่อยังตั้งหนังสือไว้ให้โยกไปมาเท่าไร ก็ย่อมจะมีแรงต้านเกิดขึ้นในทิศตรงกันข้ามกับที่โยกหนังสือออกไปมากเท่านั้น ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าเมื่อเครื่องผลิตไฟยังจ่ายกระแสไฟออกไปมากเท่าไร ก็ย่อมจะทำให้เครื่องหมุนช้าลงไปด้วยทุกที ถ้าหากว่าตัวที่หมุนอาร์มาเจอร์ยังมีแรงจลน์เท่าเดิม ฉะนั้นเพื่อที่จะให้เครื่องผลิตไฟวิ่งด้วยความเร็วเท่าเดิมได้ จึงจำเป็นต้องเพิ่มพลังงาน เช่นเดียวกับสำหรับตัวนำอื่นที่อาร์มาเจอร์ ก็จะมีอาการกริยาที่เกิดขึ้นเช่นเดียวกับตัวนำ A ไม่ว่าตัวนำเหล่านั้นจะอยู่ภายใต้ขั้ว S หรือขั้ว N นั่นคือ แรงต้านจะเกิดจากทุกๆ ตัวนำรวมกันตามเวกเตอร์ก็จะเป็นแรงลัพธ์แรงหนึ่งที่ยึดต้านการหมุนของอาร์มาเจอร์ในทิศสวนเข็มนาฬิกา ตลอดเวลาที่เครื่องกำลังจ่าย load



รูป 2 อากัปกริยาของเครื่องกำเนิดไฟเพื่อได้รับ load สมมติว่าเครื่องเดียวกันนี้ ถอดเอาตัวต้นกำเนิด (primover) ที่ใช้หมุนเครื่องกำเนิดไฟออก จากนั้นก็ใส่ไฟเข้าไป โดยให้กระแสไหลผ่านเข้าไปภายในตัว N ดังรูป 2.2 เมื่อมีกระแสไหลผ่านตัวนำในอาร์มาเจอร์ ซึ่งอยู่ภายในสนามแม่เหล็กของขั้ว N ก็ย่อมจะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นในตัวนำต่างๆบนอาร์มาเจอร์นั้น ๆ นั่นก็คือ เกิดแรงบิด (torque) ขึ้นบนอาร์มาเจอร์ในทิศสวนเข็มนาฬิกา อากัปกริยานี้ เกิดขึ้นเช่นเดียวกับอากัปกริยาที่เกิดขึ้นในขณะที่เครื่องเป็นเครื่องผลิตไฟเช่นกัน แรงบิดที่เกิดขึ้นนี้ หากทิศทางของการเคลื่อนที่ได้โดยใช้กฎมือซ้ายของเฟลมมิ่ง นั่นคือ ขณะนี้เครื่องได้ทำหน้าที่เป็นมอเตอร์ไปแล้ว จะสังเกตเห็นว่า เมื่อกระแสที่ไหลในตัวนำยังอยู่ที่ทิศทางเดิม จะทำให้มีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางเข็มนาฬิกาเช่นเดิม ซึ่งตรงกันข้ามกับทิศของตัวต้นกำเนิด (primover) ที่ใช้ขับเครื่องกำเนิดไฟ เมื่อเครื่องทำหน้าที่เป็นตัวผลิตไฟ (Generator)

จากที่กล่าวมาแล้วข้างบนพบว่า ในการเปลี่ยนรูปของพลังงานนั้น ย่อมมีแรงต้านเกิดขึ้น นั่นคือ สำหรับเครื่องผลิตไฟไฟนั้นจะเกิดแรงต้านทางกล หรือแรงแม่เหล็กลาก (magnetic drag) ขึ้น ในทิศที่ตรงข้ามกับแรงที่ใส่เข้าไป ฉะนั้นจึงต้องใส่กำลังกลเข้าไปให้มากกว่าแรงลากที่เกิดขึ้นนี้ จึงจะได้กำลังไฟออกมาจ่ายให้กับภาระไปฟ้าตามที่ต้องการได้ นั่นคือเครื่องผลิตไฟยังคงหมุนด้วยความเร็วที่ต่ำกว่านี้เป็นอัตราที่ต่ำกว่าที่อัตราที่ควรที่จะหมุนไปให้ปะทะสนามแม่เหล็กค่าหนึ่ง ๆ หนึ่ง บางทีอาจจะให้หมุนที่ความเร็วเดิมหรือน้อยกว่าก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะให้ voltage ที่ชั่วจ่ายไปให้กับภาระไฟฟ้า (load) นั้นมีค่าคงที่ หรือว่าใกล้เคียงกับตอนไม่มีภาระไฟฟ้า ส่วนมอเตอร์นั้น ก็ย่อมมีตัวต้านเกิดขึ้นเช่นเดียวกัน คือแรงเคลื่อนไฟสวน (back e.m.f.)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟ ต่างก็เกิดจากปฏิกิริยาของมอเตอร์และการผลิตไฟขึ้นในเครื่องเดียวกัน นั่นคือ เมื่อเป็นมอเตอร์ ก็เกิดอาการของมอเตอร์ (motor action) ขึ้นก่อน แล้วจึงเกิดอาการของเครื่องกำเนิดไฟ (generator action) ขึ้นมาทันทีที่มีการหมุน (back e.m.f.) ส่วนเครื่องกำเนิดไฟนั้นจะเกิดอาการของการกำเนิดไฟ (generator action) ขึ้นก่อน และจะเกิดอาการของมอเตอร์ (motor action) ขึ้น ก็ต่อเมื่อเครื่องต้องจ่ายภาระไฟฟ้าออกไป ตัวต้านที่ย่อมจะเป็นปริมาณทางไฟฟ้า แทนที่จะเป็นปริมาณทางกล ทั้งนี้เพราะมอเตอร์ได้รับไฟเข้าไป เพื่อเปลี่ยนกำลังไฟให้เป็นกำลังกล ฉะนั้นตัวต้านย่อมเป็นปริมาณทางไฟฟ้า และย่อมเกิดขึ้นภายในมอเตอร์ด้วย

จากที่กล่าวมาข้างบนนั้นจะพบว่า เมื่อใส่กระแสเข้าไปในตัวนำ ย่อมทำให้เกิดการเคลื่อนที่ นั่นคืออาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ก็เริ่มหมุน เมื่อตัวนำวิ่งตัดผ่านสนามแม่เหล็กย่อมทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟ ขึ้นในตัวนำตามหลักการของเครื่องกำเนิดไฟ ซึ่งหาได้โดยใช้กฎมือขวาของเฟลมมิ่ง แรงเคลื่อนไฟที่เกิดขึ้น จะมีทิศทางสวนหรือตรงกันข้ามกับแรงเคลื่อนไฟที่ใส่เข้าไปให้กับมอเตอร์ ดังรูป 2.3 ฉะนั้นจึงเรียกแรงเคลื่อนที่ไฟที่เกิดขึ้นว่า " แรงเคลื่อนสวน = back e.m.f." แรงเคลื่อนไฟสวน E_b นี้ขึ้นอยู่กับจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้ว จำนวนตัวนำทั้งหมดที่ต่ออนุกรมกัน ความเร็วที่มอเตอร์หมุนไป จำนวนขั้วแม่เหล็กที่มีอยู่ภายใน และจำนวนแฉง (path) ที่ขนานกัน แรงเคลื่อนไฟสวนที่มีแรงเคลื่อนเช่นเดียวกับแรงเคลื่อนที่เกิดจากการหมุน (motional e.m.f.) นั้นเอง

ปกติแล้วค่าต่าง ๆ ที่ทำให้ขนาดแรงเคลื่อนเปลี่ยนไปนี้มีค่าคงที่ ยกเว้นค่าเส้นแรงเคลื่อนต่อขั้วและความเร็วที่ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงได้ ฉะนั้นเมื่อมีแรงเคลื่อนไฟสวนเกิดขึ้นตามที่กล่าวมาแล้ว ย่อมจะต้องทำให้แรงเคลื่อนไฟที่ใส่เข้าไปให้กับเครื่องนั้นเอาชนะแรงเคลื่อนสวนให้ได้ ทั้งนี้เพราะต้องบังคับกระแสให้ไหลผ่านไปทิศทางที่สวนกับแรงเคลื่อนไฟสวน (back e.m.f.) นั่นคือ กำลังส่วนที่ใส่เข้าไปนี้สามารถเอาชนะกำลังไฟสวนได้ ฉะนั้นจึงทำให้

เอกสารได้กำลังทางกลออกมาจากมอเตอร์ และเห็นได้ชัดว่า ถ้าแรงเคลื่อนไฟที่ใส่ไม่วารณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ทั้งมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟ ต่างก็เกิดจากปฏิกิริยาของมอเตอร์และการผลิตไฟขึ้นในเครื่องเดียวกัน นั่นคือ เมื่อเป็นมอเตอร์ ก็เกิดอาการของมอเตอร์ (motor action) ขึ้นก่อน แล้วจึงเกิดอาการของเครื่องกำเนิดไฟ (generator action) ขึ้นมาทันทีที่มีการหมุน (back e.m.f.) ส่วนเครื่องกำเนิดไฟนั้นจะเกิดอาการของการกำเนิดไฟ (generator action) ขึ้นก่อน และจะเกิดอาการของมอเตอร์ (motor action) ขึ้น ก็ต่อเมื่อเครื่องต้องจ่ายภาระไฟฟ้าออกไป ตัวต้านที่ย่อมจะเป็นปริมาณทางไฟฟ้า แทนที่จะเป็นปริมาณทางกล ทั้งนี้เพราะมอเตอร์ได้รับไฟเข้าไป เพื่อเปลี่ยนกำลังไฟให้เป็นกำลังกล ฉะนั้นตัวต้านย่อมเป็นปริมาณทางไฟฟ้า และย่อมเกิดขึ้นภายในมอเตอร์ด้วย

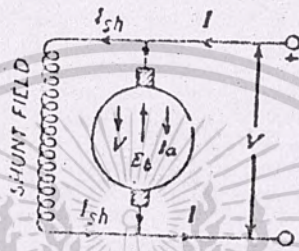
จากที่กล่าวมาข้างบนนั้นจะพบว่า เมื่อใส่กระแสเข้าไปในตัวนำ ย่อมทำให้เกิดการเคลื่อนที่ นั่นคืออาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ก็เริ่มหมุน เมื่อตัวนำวิ่งตัดผ่านสนามแม่เหล็กย่อมทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟ ขึ้นในตัวนำตามหลักการของเครื่องกำเนิดไฟ ซึ่งหาได้โดยใช้กฎมือขวาของเฟลมมิ่ง แรงเคลื่อนไฟที่เกิดขึ้น จะมีทิศทางสวนหรือตรงกันข้ามกับแรงเคลื่อนไฟที่ใส่เข้าไปให้กับมอเตอร์ ดังรูป 2.3 ฉะนั้นจึงเรียกรวมแรงเคลื่อนไฟที่เกิดขึ้นว่า " แรงเคลื่อนสวน = back e.m.f." แรงเคลื่อนไฟสวน E_b ขึ้นอยู่กับจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้ว จำนวนตัวนำทั้งหมดที่ต่ออนุกรมกัน ความเร็วที่มอเตอร์หมุนไป จำนวนขั้วแม่เหล็กที่มีอยู่ภายใน และจำนวนแฉก (path) ที่ขนานกัน แรงเคลื่อนไฟนี้ก็มีแรงเคลื่อนเช่นเดียวกับแรงเคลื่อนที่เกิดจากการหมุน (motional e.m.f.) นั้นเอง

ปกติแล้วค่าต่าง ๆ ที่ทำให้ขนาดแรงเคลื่อนเปลี่ยนไปนี้มีค่าคงที่ ยกเว้นค่าเส้นแรงเคลื่อนต่อขั้วและความเร็วที่ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงได้ ฉะนั้นเมื่อมีแรงเคลื่อนไฟสวนเกิดขึ้นตามที่กล่าวมาแล้ว ย่อมจะต้องทำให้แรงเคลื่อนไฟที่ใส่เข้าไปให้กับเครื่องนั้นเอาชนะแรงเคลื่อนสวนให้ได้ ทั้งนี้เพราะต้องบังคับกระแสให้ไหลผ่านไปทิศทางที่สวนกับแรงเคลื่อนไฟสวน (back e.m.f.)

นั่นคือ กำลังส่วนที่ใส่เข้าไปนั้นสามารถเอาชนะกำลังไฟสวนได้ ฉะนั้นจึงทำให้ได้กำลังทางกลออกมาจากมอเตอร์ และเห็นได้ชัดว่า ถ้าแรงเคลื่อนไฟที่ใส่

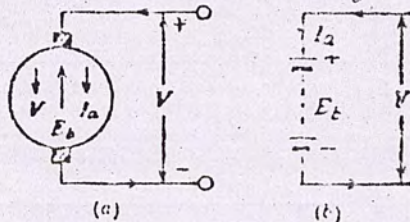
เข้าไปนี้ ไม่สามารถชนะแรงเคลื่อนไฟสวนได้ ก็ไม่อาจที่จะมีกำลังทางกลออกมาได้

สรุป จะเห็นได้ว่าแรงต้านทานที่เกิดขึ้นนั้น ๆ จะเป็นแรงชนิดเดียวกับแรงที่ใส่เข้าไป นั่นคือ ถ้าเป็นเครื่องผลิตไฟก็จะเกิดแรงต้านทางกลขึ้น เพราะใส่แรงทางกลเข้าไป และถ้าเป็นมอเตอร์ก็จะเกิดแรงต้านทานไฟฟ้าขึ้นเพราะใส่แรงเคลื่อนไฟเข้าไป



รูป 2.3 แสดงทิศของแรงเคลื่อนไฟ และกระแสที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ ซึ่งไหลไปทางเดียวกัน แต่ตรงข้ามกับแรงเคลื่อนไฟสวน

3 ความสำคัญของแรงเคลื่อนไฟสวน (SIGNIFICANCE OF THE BACK E.M.F.) จากที่กล่าวมาแล้วในตอนก่ 2 นั้นพบว่าเมื่ออาร์มาเจอร์เริ่มหมุน จะทำให้ตัวนำที่อยู่ในอาร์มาเจอร์ตัดเส้นแรงแม่เหล็ก ก็มาจากสนามแม่เหล็กหลัก หรือสนามแม่เหล็กฉัพที่ เกิดอยู่ในมอเตอร์นั้น นั่นคือ เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟขึ้นบนตัวนำภายในอาร์มาเจอร์ ซึ่งเป็นไปตามกฎของการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้ หาทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้ โดยใช้กฎมือขวาของเฟลมมิ่งและพบว่ามทิศสวนกับแรงเคลื่อนไฟที่ใส่เข้าไปให้กับมอเตอร์ ดังนั้น จึงเรียกแรงเคลื่อนที่เกิดขึ้นว่า แรงเคลื่อนสวน (back e.m.f. = E_b) ดังรูป 3.1(a)



รูป 3.1(a) วงจรของมอเตอร์ไฟตรง

(b) วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ที่เขียนแทนแรงเคลื่อนไฟสวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ได้ด้วยแบตเตอรี่ E_b ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และห้องอ ของถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการที่เกิด E_b ขึ้นนี้ จึงเขียนวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ได้ดังรูป 3.1 (b) ซึ่งเหมือนกับว่ามีแบตเตอรี่ E_b ต่อคร่อมอยู่กับแรงเคลื่อนไฟ V ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ นั่นคือในการที่จะให้ I_a ไหลได้ในอาร์มาเจอร์นั้น จะต้องมีการจ่ายไฟจำนวนหนึ่งที่ต้องเอาชนะการสวนกันกำลังไฟที่เอาชนะกำลังที่สวนกันได้คือ $E_b I_a$

ในกรณีที่เป็นเซลล์หรือแบตเตอรี่นั้น กำลังที่เอาชนะการสวนกันก็คือ กำลังที่เปลี่ยนไปเป็นกำลังงานทางเคมี แต่ในมอเตอร์นั้น กำลังที่เอาชนะการสวนกันก็คือ กำลังที่เปลี่ยนไปเป็นกำลังกลนั่นเอง

$$\begin{aligned} \text{นั่นคือ กระแส } I_a \text{ จะมีค่า} &= \frac{\text{แรงเคลื่อนไฟที่ได้ในวงจร}}{\text{ค.ต.ท. ในวงจรของอาร์มาเจอร์}} \\ &= \frac{\text{net voltage}}{\text{armature circuit resistance}} \\ &= \frac{V - E_b}{R_a} \end{aligned}$$

ตามที่ได้กล่าวมาในตอนต้นแล้วว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้น จากการหมุนของตัวนำในสนามแม่เหล็กมีค่า $E = \frac{\phi Z S P}{60 a}$ ดังนั้น $E_b = \frac{\phi Z S P}{60 a}$

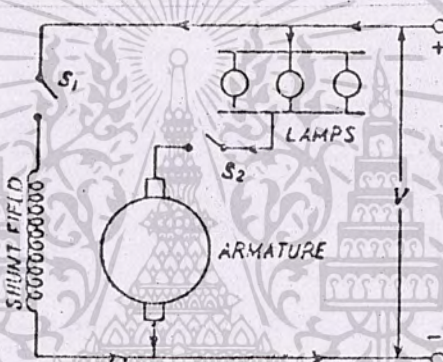
และพบว่า E_b ขึ้นอยู่กับตัวประกอบต่าง ๆ เช่น ϕ, Z, S, P และ a แต่เนื่องจากว่า Z, P เป็นค่าคงที่ในการพันอาร์มาเจอร์ของแต่ละเครื่องที่แตกต่างกัน

$$\begin{aligned} E_b &= K_a \phi S \\ \text{เมื่อ } K_a &= \text{ค่าคงที่ทางไฟฟ้า} = \frac{Z P}{60 a} \\ S &= \text{ความเร็วเป็น r.p.m.} \\ \phi &= \text{เส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้ว (wb)} \end{aligned}$$

จากสมการ E_b ที่กล่าวมานี้ พบว่า E_b จะมากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับค่า ϕ และ S ฉะนั้นเพื่อให้ ϕ คงที่จึงพบว่า E_b เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็ว S นั่นคือ เมื่อ S มีค่ามาก จะทำให้ E_b มีค่ามาก และย่อมทำให้ I_a มีค่าน้อย (เมื่อ V คงที่ นั่นคือผลต่างของ V กับ E_b มีค่าน้อยเมื่อ $R_a = \text{คงที่}$) จึงทำให้

แรงบิด (torque) ที่มอเตอร์จ่ายออกมามีค่าน้อยด้วยเช่นเดียวกัน เมื่อ S มีค่าน้อย ย่อมทำให้ I_a มีค่ามาก ผลที่ได้ก็คือ เกิดแรงบิดขึ้นมาจากมอเตอร์ (ซึ่งจะกล่าวต่อไปข้างหน้าเกี่ยวกับเรื่องแรงบิด) ดังนั้น จะพบว่า E_b เป็นตัวที่คอยควบคุมการไหลของกระแส I_a ในอาร์มาเจอร์ นั้นเอง นั่นคือ E_b เป็นตัวทำให้มอเตอร์มีการควบคุมอยู่ในตัวของมันเอง โดยการดึงกระแสเท่าที่จำเป็น ต้องใช้ เพื่อให้มอเตอร์หมุนได้ในภาวะที่ต้องการ เพื่อให้เกิดการสมดุลย์ตามกฎการทรงมวลนั่นเอง

เพื่อที่จะพิสูจน์ให้เห็นว่า มีแรงเคลื่อนไฟสวน E_b เกิดขึ้นจริงในมอเตอร์ จึงทำให้เห็นได้โดยการทดลองดังรูป 3.2



รูป 3.2 การทดสอบหาแรงเคลื่อนไฟสวน ในมอเตอร์ไฟตรง

จากรูปนี้ พบว่ามีหลอดไฟ 3 หลอดต่อขนานกันเอง หลอดไฟทั้ง 3 นี้ต่ออนุกรมกับสวิตซ์ S_2 ซึ่งต่ออนุกรมกับอาร์มาเจอร์อีกทีหนึ่ง

วิธีการทดลองทำได้โดย การใส่ไฟ V เข้าไปให้กับมอเตอร์จากนั้นต่อสวิตซ์ S_1 เข้ากับวงจร เพื่อให้ shunt field มีกระแสไหลเต็มที่ นั่นคือมีเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด จากนั้นให้ต่อสวิตซ์ S_2 เข้ากับอาร์มาเจอร์ จะพบว่าหลอดไฟทั้ง 3 สว่างมาก เมื่อมอเตอร์เริ่มหมุน และจะค่อย ๆ มีความสว่างลดลง เมื่อมอเตอร์เริ่มหมุนเร็วขึ้น นั่นก็หมายความว่า E_b เพิ่มขึ้น แต่ I_a ลดลง และย่อมทำให้แรงเคลื่อนไฟที่ตกคร่อมหลอดไฟน้อยลง หลอดไฟจะหรี่มากเมื่อความเร็วของมอเตอร์มากขึ้นเต็มที่ (full speed) เมื่อต้องการให้หลอดไฟสว่างขึ้น ก็ทำได้โดยการทำให้ความเร็วของมอเตอร์ลดลง นั่นคือเพิ่ม load ให้กับมอเตอร์ซึ่งเป็นเหตุให้ความเร็วลดลง เมื่อความเร็วลดลง I_a จะเพิ่มแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มอบให้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาจเปิดสวิตช์ S_1 ในขณะที่ไฟใส่เข้าไปในวงจรอาร์มาเจอร์ เพราะจะทำให้ความเร็ววิ่งเข้าสู่อนันต์ (infinity) ไม่ว่ามอเตอร์จะอยู่นิ่งหรือกำลังหมุนอยู่ก็ตาม)

4 สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าของ MOTOR (VOLTAGE EQUATION OF MOTOR)

จากกฎของ Kirchoff ได้

$$V = E_b + I_a R_a = \text{voltage equation}$$

$$E_b = \text{แรงเคลื่อนไฟต้านหรือกลับหรือสวน (back e.m.f.)}$$

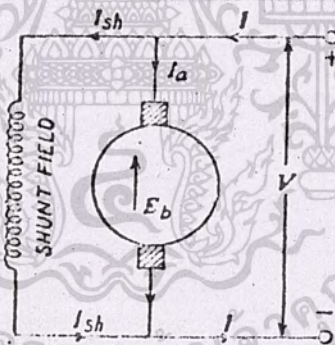
โวลท์

$$V = \text{แรงเคลื่อนไฟที่ขั้วมอเตอร์ (terminal voltage)}$$

โวลท์

จากสมการข้างบนได้

$$VI_a = I_a E_b + I_a^2 R_a$$



shunt field resistance

รูป 4.1 วงจรของ shunt motor

จากรูป 4.1 ได้

$$VI_a = \text{ไฟที่จ่ายให้กับอาร์มาเจอร์} \quad (\text{วัตต์})$$

$$= \text{electrical input to the armature (watts)}$$

$$E_b I_a = \text{กำลังไฟที่เกิดขึ้นในอาร์มาเจอร์ ซึ่งสมมูลกับกำลังกลที่เกิดขึ้น } P_m \text{ ในอาร์มาเจอร์} \quad (\text{วัตต์})$$

$$E_b I_a = \text{electrical equivalent of mechanical power developed in the armature } (P_m) \text{ (watts)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 power developed in the armature (P_m) (watts)
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_a^2 R_a = \text{การสูญเสียกำลังงานอันเนื่องมาจากค่า ค.ต.ท. ในอาร์มาเจอร์} \quad (\text{วัตต์})$$

$$= \text{Cu loss in armature} \quad (\text{watts})$$

5 ภาวะที่มีกำลังสูงสุด (CONDITION FOR MAXIMUM POWER = P_{max})

กำลังทางกลที่เกิดขึ้นมาในอาร์มาเจอร์

$$P_m = VI_a - I_a^2 R_a$$

$$P_{max} \text{ จะเกิดขึ้นได้เมื่อ } \frac{dP_m}{dI_a} = 0$$

$$dI_a$$

$$\therefore \frac{dP_m}{dI_a} = V - 2I_a R_a = 0$$

$$dI_a$$

$$\therefore I_a R_a = V/2$$

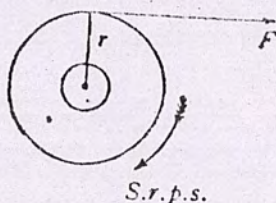
$$\text{ขณะที่ } V = E_b + I_a R_a \text{ และ } I_a R_a = V/2$$

$$\therefore V = E_b + V/2 \text{ นั่นคือ } E_b = V/2 \text{ ด้วย}$$

ดังนั้น P_{max} เมื่อ $E_b = V/2$ ในภาวะเช่นนี้ไม่มีจริง ๆ ในทางปฏิบัติ

เพราะจะทำให้กระแสมีค่ามากเกินไปกว่าค่าของกระแสตามปกติ ในมอเตอร์ (ดูจากสมการ $I_a = V/2 R_a$) ยิ่งกว่านั้น input ที่ใส่เข้าไปเพียงครึ่งเดียว ก็จะทำให้เกิดการสูญเสียไปในรูปของความร้อน และยังรวมทั้งการสูญเสียอย่างอื่นที่เกิดขึ้นอีก (ทางกลและทางแม่เหล็ก) ซึ่งต้องนำมาพิจารณาด้วย ฉะนั้นประสิทธิภาพก็จะมีค่าต่ำกว่า 50%

6 TORQUE (แรงบิด) ก็คือการหมุนหรือการบิดของโมเมนต์ของแรง ๆ หนึ่ง ที่กระทำรอบแกนอันหนึ่งวัดได้จากผลคูณของแรงกับรัศมี ณ ที่จุดแรงไปกระทำ



พิจารณาวงล้อที่มีรัศมี r เมตร มีแรง F นิวตันมากระทำบนวงล้อนี้จึงทำ

เอกสารนี้ให้เกิดการหมุนด้วยความเร็ว S รอบ/วินาที นั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\therefore \text{แรงบิด} = F \times r \text{ นิวตัน - เมตร}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{งานที่ทำได้ใน 1 รอบจากแรงนี้} \\ &= \text{แรง} \times \text{ระยะทาง} \\ &= F \times 2\pi r \text{ จูลส์} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{งานที่ทำต่อวินาที } W &= F \times 2\pi r \times S \\ &= F \times r \times 2\pi S \end{aligned}$$

$$\text{แต่ } 2\pi S = \text{มุมเป็น } \theta \text{ เรเดียนต่อวินาที}$$

$$F \times r = \text{แรงบิด } T$$

$$\therefore \text{งานที่ทำต่อวินาที} = T \times \theta \text{ จูลส์}$$

$$\therefore \text{กำลังที่เกิดขึ้น} = T \times \theta \text{ วัตต์}$$

7 แรงบิดที่เกิดขึ้นในอาร์มาเจอร์ (ARMATURE TORQUE OF A MOTOR) ให้ T_m เป็นแรงบิดที่เกิดขึ้นจากอาร์มาเจอร์ เมื่อมอเตอร์วิ่งด้วยความเร็ว S รอบ/วินาทีโดย T_m เป็นนิวตัน - เมตร

$$\therefore \text{งานที่ทำต่อวินาที} = T_m \times 2\pi S \text{ จูลส์}$$

$$\text{หรือกำลังที่เกิดขึ้น } P_m = T_m \times 2\pi S \text{ วัตต์} \dots \dots \dots (1)$$

เรารู้ว่ากำลังไฟที่ได้เปลี่ยนไปเป็นกำลังกลในอาร์มาเจอร์ คือ

$$= E_b I_a \text{ วัตต์} \dots \dots \dots (2)$$

$$(1) = (2) \therefore T_m \times 2\pi S = E_b I_a$$

$$\therefore E_b = \frac{P}{a} = K' \phi S$$

$$\therefore T_m = \frac{1}{2\pi} K' \phi = K_c \phi I_a$$

$$\text{เมื่อ } K_c = \frac{K' \phi}{2\pi} = \text{ค่าคงที่ของแรงบิด (Torque)}$$

$$S = \text{ความเร็ว (r.p.s.)}$$

$$T_m = 0.159 K' \phi I_a \text{ นิวตัน - เมตร}$$

$$= 0.0162 K' \phi I_a \text{ กิโลกรัม - เมตร}$$

$$(\therefore 1 \text{ กิโลกรัม - น.น.} = 9.81 \text{ นิวตัน})$$

$$\text{เมื่อ } K' = \frac{ZP}{a} = \text{ค่าคงที่ทางไฟฟ้า}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\therefore T_m = T_a \phi I_a$$

$$\therefore a) \text{ ในกรณีของ series motor } T \propto I_a^2$$

$$\therefore b) \text{ สำหรับ shunt motor } T \propto I_a$$

$$\therefore T = \frac{1}{2\pi} \frac{E_b I_a}{S} \quad \text{N-m}$$

$$= \frac{1}{2\pi} \frac{E_b I_a}{S}$$

$$= 0.159 \frac{E_b I_a}{S} \quad \text{N-m}$$

$$= 0.0162 \frac{E_b I_a}{S} \quad \text{Kg-m}$$

เมื่อ S เป็นความเร็ว (r.p.s.)

8 แรงบิดที่แกน (SHAFT TORQUE = T_{sh}) แรงบิดที่เกิดขึ้นในอาร์มาเจอร์นั้น ไม่ได้นำไปใช้งานเลยทีเดียว ทั้งนี้เพราะต้องจ่ายให้กับการสูญเสียอื่นเนื่องมาจาก iron และ friction ใน motor

$$\therefore \text{แรงบิดที่เอาไปใช้งานก็คือแรงบิดที่แกน } (T_{sh})$$

\therefore กำลังม้าที่ได้จากแกนหมุนของมอเตอร์ก็คือ B.H.P. นั้นเองซึ่งเป็นกำลังม้าที่ได้จากการ brake motor

$$\text{B.H.P. (metric)} = \frac{T_{sh} \times 2\pi S}{735.5}$$

$$= \frac{735.5 \times \text{B.H.P. metric}}{2\pi S}$$

$$= \frac{735.5 \times \text{B.H.P. metric}}{2\pi S}$$

$$= \frac{735.5 \times \text{B.H.P. metric}}{2\pi S}$$

เมื่อ S = ความเร็ว (r.p.s.)

$$\therefore T - T_{sh} \text{ ก็คือ lost torque}$$

$$\therefore \text{Lost torque } T_L = 0.159 \times \frac{\text{iron และ friction losses}}{S} \quad \text{N-m}$$

S

$$= 0.0162 \times \frac{\text{iron และ friction losses}}{S} \quad \text{Kg-m}$$

S

ข้อสังเกต ค่า E_b หาได้จาก

$$1) E_b = V - I_a R_a$$

$$2) E_b = \phi Z S (P/a) \quad \text{โวลต์}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในวงวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 9 ความเร็วของ MOTOR กระแสไฟตรง (Speed of D.C. motor)
 ไม่วารณมีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\therefore E_b = V - I_a R_a$$

$$\therefore K_\phi S = V - I_a R_a$$

$$\therefore S = \frac{V - I_a R_a}{K_\phi} \times \frac{1}{60} \text{ r.p.m.}$$

เมื่อ $K_\phi = \frac{ZP}{60xa} =$ ค่าคงที่ทางไฟฟ้า

$$\therefore V - I_a R_a = E_b$$

$$\therefore S = \frac{E_b}{K_\phi} \text{ r.p.m.}$$

$$\therefore S \propto E_b / \phi$$

สำหรับ Series motor

$$S_1 \propto \frac{E_{b1}}{\phi_1} \dots \dots \dots \text{เมื่อ } E_{b1} = V - I_{a1} R_a$$

$$S_2 \propto \frac{E_{b2}}{\phi_2} \dots \dots \dots \text{เมื่อ } E_{b2} = V - I_{a2} R_a$$

$$S_2 = \frac{E_{b2}}{E_{b1}} \times \frac{\phi_1}{\phi_2}$$

S_1 E_{b2} ϕ_1 ϕ_2 ... (เมื่อ ϕ ไม่คงที่เมื่อ load เปลี่ยน)

ก่อนที่ขั้วแม่เหล็กจะอิ่มตัวได้ $\phi \propto I_a$

$$\therefore \frac{S_2}{S_1} = \frac{E_{b2}}{E_{b1}} \times \frac{J_{a1}}{J_{a2}}$$

สำหรับ shunt motor

ในการณณกัสมการเหมือนกัน

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{E_{b2}}{E_{b1}} \times \frac{\phi_1}{\phi_2}$$

$$S_1 \quad E_{b1} \quad \phi_2$$

ถ้า $\phi_2 = \phi_1$ แล้ว จะได้ $\frac{S_2}{S_1} = \frac{E_{b2}}{E_{b1}}$

10 SPEED REGULATION ก็คือผลต่างของความเร็วระหว่างไม่มี load กับเมื่อได้รับ load เต็มที่

$$\% \text{ Speed reg} = \frac{N.L.\text{speed} - F.L.\text{speed}}{F.L.\text{speed}} \times 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา F.L. speed ได้ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11 คุณสมบัติประจำของมอเตอร์ (Motor Characteristics) คุณสมบัติประจำของมอเตอร์ก็คือ เส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ ระหว่างปริมาณต่าง ๆ ที่มอเตอร์ได้ส่งออกมาหรือได้รับเข้าไป ซึ่งมีทั้งปริมาณไฟฟ้าและปริมาณทางกล ความสัมพันธ์ต่าง ๆ ที่จะพิจารณามีดังนี้

1) แรงบิดของกระแสอาร์มาเจอร์ก็คือ การแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง "แรงบิดกับกระแสที่ไหลในอาร์มาเจอร์ (T/I_a)" คุณสมบัติชนิดนี้รู้จักกันในรูปของ คุณสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical Characteristic)"

2) ความเร็วและกระแสอาร์มาเจอร์ก็คือ ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับกระแสที่ไหลในอาร์มาเจอร์ นั่นคือ คุณสมบัติของ S/I_a

3) ความเร็วและแรงบิด ก็คือ การแสดงความสัมพันธ์ โดยใช้เส้นกราฟระหว่างความเร็วกับแรงบิด S/T คุณสมบัติเช่นนี้เรียกว่า "คุณสมบัติทางกล (Mechanical Characteristic)" คุณสมบัติข้อนี้หาได้จากข้อ1)และข้อ2)

ในการปกก หรือ วิจารณ์เกี่ยวกับเรื่องคุณสมบัติของมอเตอร์นี้ เราควรที่จะคำนึงถึงความสัมพันธ์ ของปริมาณที่ควรสนใจเอาไว้ในใจดังนี้

$$T \propto \phi I_a$$
$$\text{และ } S \propto \frac{E_b}{\phi}$$

11.1 คุณสมบัติประจำของมอเตอร์แบบขนาน (Characteristics of Shunt Motors) คุณสมบัติที่พิจารณามีดังนี้

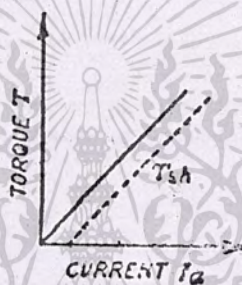
1) คุณสมบัติระหว่างแรงบิด T กับ กระแสอาร์มาเจอร์ I_a ในการพิจารณาคุณสมบัติเช่นนี้จะกำหนดให้ว่า ϕ เส้นแรงแม่เหล็ก ϕ ที่เกิดจากจากสนามกระตุ้นมีค่าคงที่ตลอดไปแม้ว่าเมื่อมอเตอร์ได้รับภาระมาก จะทำให้ ϕ ลดลงไปก็ตาม นั่นคือให้ ϕ เป็นค่าคงที่ทุก ๆ ภาระที่มอเตอร์ได้รับ ดังนั้นในกรณีที่เป็นมอเตอร์แบบขนาน จึงได้ความสัมพันธ์ระหว่าง T กับ I_a คือ

$$T \propto \phi I_a \dots\dots\dots (\phi = \text{คงที่})$$

นั่นคือเมื่อ plot graph ระหว่าง T กับ I_a จึงได้ graph เป็นเส้นตรงโดยเริ่มต้นจากค่าศูนย์ด้วยกันทั้งคู่ ดังรูป 11.1 เส้นกราฟที่ได้นี้เป็นเส้นตรงผ่านจุดเริ่มต้น (original) แรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ หากมีข้อสงสัยประการใด กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการ โทร. 0-2310-3100

ที่แกน (shaft) ของมอเตอร์เมื่อส่งออกมาข้างนอกนั้น จึงต้องมีค่าน้อยกว่า แรงบิดที่เกิดขึ้น T ณ ที่ค่ากระแส I_a เดียวกันซึ่งเห็นได้ในรูป 11.1 ดังเส้น ประ การที่ T_{sh} น้อยกว่า T ที่ค่ากระแสเดียวกันนี้ เนื่องจากว่าต้องสูญเสีย แรงบิดจำนวนหนึ่งไป เพื่อเอาชนะแรงเสียดทานที่แกน (shaft) ได้รับ ค่าแรงเสียดทานนี้ถือว่าคงที่ตลอดไป ดังนั้นเส้น graph ของ T_{sh} จึงมี slope เท่ากับเส้น graph ของ T จากรูปนี้พบว่าเราไม่อาจใช้ shunt มอเตอร์ start ในขณะที่มี load หนัก ๆ ได้ เพราะการทำเช่นนั้น ย่อมทำให้มอเตอร์ ต้องดึงกระแสจำนวนมากเข้าไปใช้ด้วย นั่นคือ shunt มอเตอร์จะไม่ใช่ ในการ start load ที่หนัก ๆ



11.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับกระแสของมอเตอร์ชาน

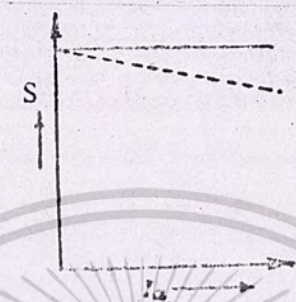
2) คุณลักษณะระหว่างความเร็ว S กับกระแสอาร์มาเจอร์ I_a ในการ พิจารณากรณีนี้ก็ยังคงให้ ϕ คงที่ตลอดไป นั่นคือ จะได้ค่าความเร็ว S เป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงเคลื่อนไฟสวน E_b ($S \propto E_b$) ในทางปฏิบัติแล้วมักให้ความเร็วที่ใช้งานกับ load มีค่าคงที่ นั่นคือ E_b ต้องคงที่ด้วย แต่ถ้าจะกล่าวกันตามความเป็นจริงแล้ว ทั้ง E_b และ ϕ ลดไปเมื่อ load เพิ่มขึ้นแต่การลดของ E_b นั้นลดลงไปมากกว่าการลดของ ϕ ฉะนั้นเมื่อรวมผลทั้งหมดที่เกิดขึ้นแล้วความเร็วย่อมลดลงไป ($\because E_b$ ลดไปเป็นอัตราส่วนมากกว่า ϕ) ดังรูป 11.2 ที่แสดงด้วยเส้นประเมื่อมอเตอร์ได้รับ load แต่ในทางปฏิบัติแล้วมักใช้ shunt motor เมื่อต้องการความเร็วคงที่

เนื่องจากมอเตอร์แบบชาน (shunt motor) นี้ไม่มีการเปลี่ยน หรือลดความเร็วไปมากนัก จากเมื่อตอนมีภาระถึงตอนที่ภาระเต็มที่ ดังนั้น จึงต่อเข้าหรือตัดออกได้จากภาระ (load) โดยทันทีทันใดได้ โดยไม่ต้องเกรงว่าจะ

มีความเร็วสูงมากเกินจนเป็นอันตราย อย่างไรก็ตาม มอเตอร์แบบนี้ให้แรงบิดเริ่ม

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

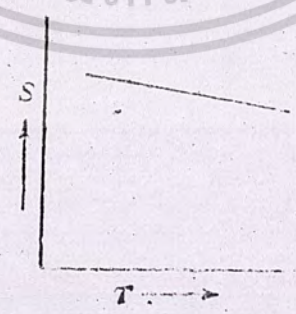
แรงต่ำ (low starting torque) ฉะนั้น จึงไม่นิยมใช้กับ load ที่ต้องการแรงบิดเริ่มแรกสูง แต่เนื่องจากว่าเป็นมอเตอร์แบบที่มีความเร็วค่อนข้างจะคงที่มาก ฉะนั้นจึงเหมาะที่จะนำไปใช้ขับเคลื่อนของเครื่องกลึง, machine tools, wood-working machines และเครื่องจักรชนิดต่าง ๆ ที่ต้องการความเร็วคงที่โดยประมาณ



11.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับแรงบิดของมอเตอร์ชาน

3) คุณลักษณะประจำของเครื่องระหว่างความเร็ว S กับแรงบิด T นี้ก็อาศัยจากหลักการที่ได้ในข้อ (1) และ (2) ข้างบนนั่นเอง จากข้อ 1ทราบ ว่าแรงบิด T เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ I_a^2 ดังรูป 11.1 ฉะนั้นจึงได้ ความสัมพันธ์ระหว่าง S กับ T ดังรูป 11.3

11.2 คุณลักษณะประจำของมอเตอร์ชนิดอนุกรม (Characteristics of Series Motors) เป็นคุณลักษณะประจำตัวของมอเตอร์ในเรื่องของแรงบิด T กระแสในอาร์มาเจอร์ I_a และความเร็ว S ของมอเตอร์ชนิดนี้เช่นกัน โดยแบ่งการพิจารณาความสัมพันธ์แต่ละอย่างได้ดังนี้



รูป 11.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับแรงบิด T ของมอเตอร์ชาน

1) คุณลักษณะประจำระหว่างแรงบิด T กับกระแสอาร์มาเจอร์ I_a ในการพิจารณานี้ สามารถพิจารณาได้จากสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด T กับกระแส I_a จากสมการที่ได้พิสูจน์มาแล้วในตอนต้นนั้นคือ

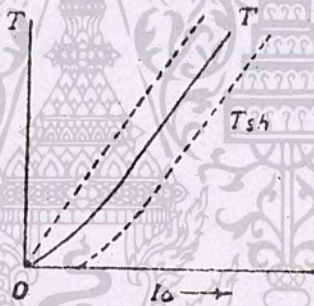
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ร่วมกันของบรรดาผู้ที่เกี่ยวข้องเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T \propto I_m$$

แต่ $\propto I_m$

$$\dots T \propto I_m^2$$

นั่นคือ T/I_m curve จำเป็น parabola ดังรูป 11.4 ฉะนั้นขณะที่ load น้อย I_m ก็จะมีน้อยและ θ ก็จะมีน้อย และเมื่อ load มากขึ้น จะได้แรงบิด T เพิ่มขึ้นเป็นอัตราส่วนกับกระแสอาร์มาเจอร์กำลังสอง แต่เมื่อ load เพิ่มมากขึ้นจนทำให้เส้นแรงแม่เหล็กเกิดการอิ่มตัวแล้ว ก็จะพบว่าแรงบิดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสที่เพิ่มขึ้น ($T \propto I_m$) เพียงอย่างเดียว นั่นคือได้เส้นกราฟระหว่าง T กับ I_m เป็นเส้นตรง ส่วนแรงบิดที่จ่ายออกมาที่แกน (T_{sh} = Shaft torque) นั้น มีค่าน้อยกว่าแรงบิดที่เกิดขึ้น T เพราะมีการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน แรงลมและค่าสูญเสียที่คงที่อื่น ๆ อีก ค่าสูญเสียเหล่านี้คือ "Strat losses" แรงบิด T_{sh} นี้แสดงไว้ในรูปด้วยเส้นประแล้ว



รูป 11.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง T กับ I_m ของมอเตอร์อนุกรม

จากคุณลักษณะระหว่างแรงบิด T กับอาร์มาเจอร์ I_m ที่กล่าวมาแล้วข้างบนนี้ จึงสรุปได้ว่า มอเตอร์แบบอนุกรมนี้เหมาะสำหรับที่จะจุด load เริ่มแรกที่มี load หนัก ๆ ได้ (ในขณะที่ยังไม่มีการอิ่มตัวของเส้นแรงแม่เหล็ก) ดังนั้น จึงเหมาะที่จะใช้กับ load หนักในขณะเริ่มแรก เช่น ปั่นจั่น (hoist) รถไฟฟ้า (electric trains) และอื่น ๆ

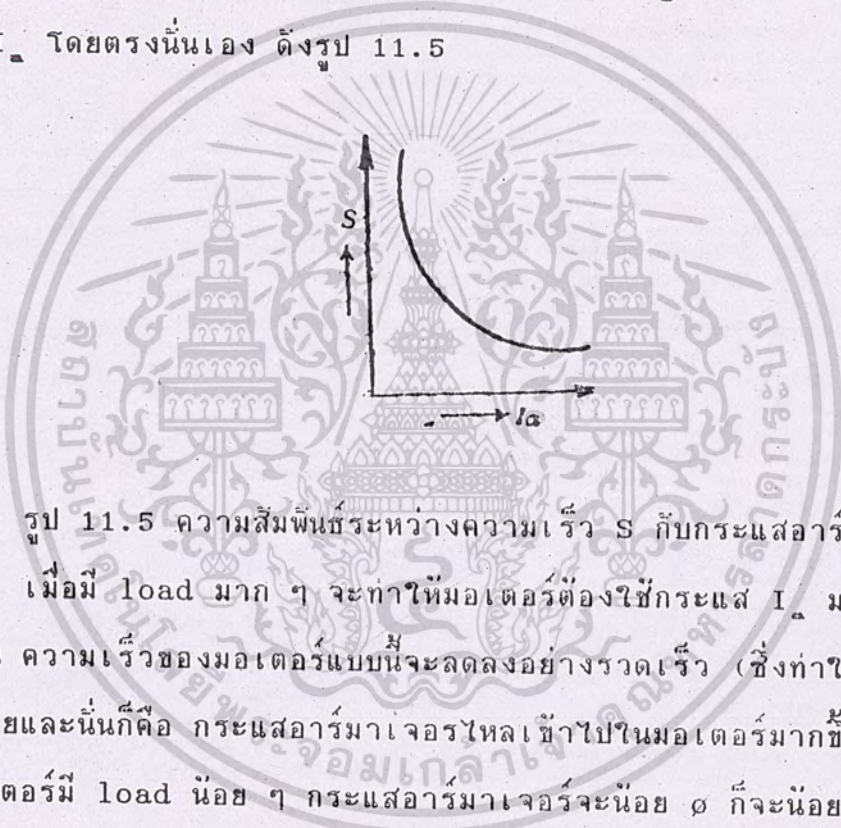
2) คุณลักษณะประจำระหว่างความเร็ว S กับกระแสอาร์มาเจอร์ I_m ของมอเตอร์อนุกรม การศึกษานี้ เป็นการศึกษาเพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว S กับกระแสที่อาร์มาเจอร์ I_m ได้รับเช่นกัน ทั้งนี้เพื่อให้เห็นถึงคุณลักษณะประจำตัวของมอเตอร์แบบนี้นำไปใช้งานนั่นเอง อย่างไรก็ตาม คุณลักษณะเช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่คัดลอกได้จากความสัมพันธ์ของสมการคือ มอเตอร์อนุกรมให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S \propto E_b$$

o

จากสมการ พบว่าความเร็ว S เป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงเคลื่อนสวน E_b แต่ E_b นี้มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ไม่ว่าที่ค่าภาระทางกลใด ๆ ก็ตาม และพบว่า ความเร็ว S แปรผันผกผันกับเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ แต่เส้นแรงแม่เหล็ก ϕ นี้แปรผันโดยตรงกับกระแสที่ไหลผ่านอาร์มาเจอร์ I_a นั่นคือ ความเร็วแปรผันผกผันกับกระแสอาร์มาเจอร์ I_a ฉะนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของ load จึงทำให้ความเร็ว S มีการแปรผันผกผันกับ ϕ มากกว่า E_b นั่นคือ S แปรผันผกผันกับ I_a โดยตรงนั่นเอง ดังรูป 11.5



รูป 11.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว S กับกระแสอาร์มาเจอร์ I_a

เมื่อมี load มาก ๆ จะทำให้มอเตอร์ต้องใช้กระแส I_a มาก ๆ ดังนั้น ความเร็วของมอเตอร์แบบนี้จะลดลงอย่างรวดเร็ว (ซึ่งทำให้ลด E_b ลงไปด้วยและนั่นก็คือ กระแสอาร์มาเจอร์ไหลเข้าไปในมอเตอร์มากขึ้น) แต่ในกรณีที่มอเตอร์มี load น้อย ๆ กระแสอาร์มาเจอร์จะน้อย ϕ ก็จะน้อยลงไปด้วยจำนวนมาก ดังนั้นความเร็ว S ก็จะสูงขึ้น จนอาจเป็นอันตรายต่อมอเตอร์ได้ นั่นก็คือ สำหรับมอเตอร์แบบอนุกรมนี้ ต้องไม่ start หรือให้เริ่มหมุนในขณะที่ไม่มี load มิฉะนั้นแล้ว จะทำให้มีความเร็วสูงมากเกินไปจนเป็นอันตรายกับมอเตอร์ได้ อันเนื่องมาจากแรงหนีศูนย์กลางที่เกิดขึ้น ในที่นี้ควรจะสังเกตว่ามอเตอร์แบบนี้เป็นมอเตอร์แบบที่มีความเร็วเปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงของการเปลี่ยนแปลงของ load ที่มอเตอร์ได้รับ

3) คุณลักษณะทางกลของเครื่อง (Mechanical Characteristic)

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของโรงเรียนการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาหรือความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว S กับแรงบิด T ที่เกิดขึ้น ความสัมพันธ์ในไมวากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีนี้ อาศัยหลักเกณฑ์จากข้อ (1) และ (2) ที่กล่าวมาแล้วข้างบน โดยที่พบว่า T เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ I_a^2 เมื่อตอนที่ ϕ ยังไม่อิ่มตัว แต่เมื่อ ϕ อิ่มตัวแล้ว ก็จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ I_a เท่านั้น และยังพบจากข้อ (2) อีกว่า เมื่อความเร็วสูง ๆ นั้นมี load น้อย (I_a น้อย) ส่วนความเร็วต่ำ load มาก (I_a น้อย) ส่วนความเร็วต่ำ load มาก (I_a มาก) ดังนั้นจึงนับได้ว่า เมื่อความเร็วสูง มอเตอร์ก็ให้แรงบิดต่ำ และในทำนองกลับกัน เมื่อความเร็วต่ำก็ให้แรงบิดสูง ดังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด T กับความเร็ว S ไว้ในรูป 2.11-6



รูป 11-6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว S กับแรงบิด T ของมอเตอร์อนุกรม

11.3 คุณสมบัติประจำตัวของมอเตอร์แบบผสม (Characteristic of Compound Motor) ลักษณะประจำตัวของมอเตอร์แบบนี้คือการนำเอาคุณสมบัติประจำตัวของมอเตอร์ทั้ง 2 แบบมาผสมกันทั้งนี้ เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน มอเตอร์แบบผสมนี้แบ่งเป็น 2 แบบโดยแบ่งตามลักษณะการต่อ series field เพิ่มเข้าไปให้กับ shunt motor ดังนี้

1) มอเตอร์แบบผสมชนิดสะสมหรือเสริมสนามแม่เหล็กให้มากขึ้น (Cumulative Compound Motor) มอเตอร์แบบนี้ จะต่อสนามอนุกรม (series field) เพิ่มเข้าไปโดยให้มีสนามแม่เหล็กที่ต่อเพิ่มเข้าไปนี้ไปช่วยเพิ่ม หรือเสริมกับสนามแม่เหล็กชานาน (shunt field) ของมอเตอร์แบบชานาน ดังนั้นจึงทำให้มอเตอร์แบบนี้รวมคุณสมบัติของมอเตอร์ที่เป็นทั้งแบบอนุกรม และแบบชานานเข้าด้วยกัน นั่นคือ ขณะที่มอเตอร์ได้รับ load สนามอนุกรมก็เพิ่มสนามแม่เหล็กขึ้น จึงทำให้เกิดแรงบิดมากขึ้นกว่าเมื่อเป็นมอเตอร์แบบชานาน (shunt motor) และอาจกล่าวไปในทางอื่นก็ได้ คือ จากการเพิ่มสนามแม่เหล็กนี้ ย่อม

เอกสารนี้จัดทำให้ความเร็วลดลงไปรวดเร็วมากกว่าเพื่อเป็นมอเตอร์แบบชานาน นั่นคือเมื่อไม่วารณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นแบบ shunt มอเตอร์ ดังรูป 11.7

มอเตอร์แบบนี้เกิดแรงบิดที่อาร์มาเจอร์สูงในขณะที่ได้รับ load ทันทันทันใด และยังมีความเร็วที่ค่า ๆ หนึ่ง ในขณะที่ไม่มีภาระหรือ load นั้นก็คือ แม้ว่าจะไม่มีภาระ ก็ไม่ทำให้มอเตอร์มีความเร็วสูงเกินไปจนเกิดอันตรายได้

ในการนำมอเตอร์ชนิดนี้ไปใช้งานนั้น มักนำไปใช้กับการขับ load ที่หนักหนัก เช่น เครื่องโม่หิน เครื่องตัดเหล็ก (shear) หรือเครื่องอัดย้ำ (punch) crane, elevator (ลิฟท์) เป็นต้น เครื่องจักรกลต่าง ๆ เหล่านี้ มักไม่สะดวกในการนำมอเตอร์แบบอนุกรม (series motor) มาใช้ เพราะมอเตอร์อนุกรมนี้ต้องต่อกับ load ตลอดเวลา

ในการนำมอเตอร์แบบผสมชนิดผสมไปใช้กับลิฟท์นั้น มักจะทำการลัดวงจรขดสนามอนุกรม เมื่อมอเตอร์มีความเร็วถึงที่ต้องการ ทั้งนี้เพื่อให้ความเร็วของลิฟท์ในการเคลื่อนที่ขึ้นลงมีค่าสม่ำเสมอ

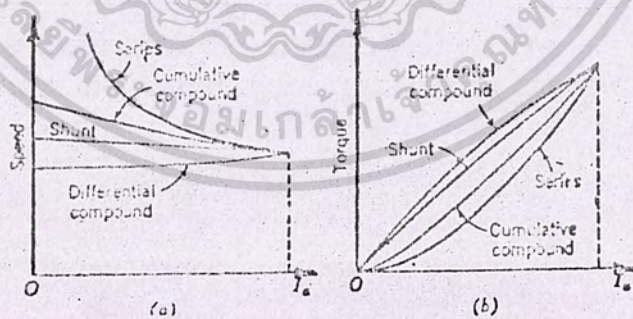
ข้อดีอีกอย่างหนึ่งของมอเตอร์แบบนี้ก็คือ สามารถปรับความเร็วของตัวมันเองให้ลดลงโดยอัตโนมัติ ในขณะที่ได้รับ load ทันทัน ในการเพิ่มพลังงานกลผสมของเครื่องแบบนี้ ทำได้โดยการต่อ pulley เข้าไป ซึ่งจะช่วยให้มีเสถียรภาพในการใช้งานดีขึ้น

2) มอเตอร์แบบผสมชนิดที่มีสนามแตกต่าง (Differential-Compound) หรือ ชนิดที่สนามอนุกรมหักล้างกับสนามขนาบ มอเตอร์ชนิดนี้มีสนามอนุกรมสวนทางกับสนามขนาบ ดังนั้นจึงทำให้สนามแม่เหล็กลดไป ขณะที่มอเตอร์ได้รับ load เพิ่มขึ้น ฉะนั้นจึงทำให้มอเตอร์มีความเร็วคงที่ชั่วขณะหนึ่ง หรือความเร็วเพิ่มขึ้นเมื่อ load เพิ่มขึ้นดังรูป 11.7 จากคุณลักษณะของมอเตอร์ที่ว่า เมื่อแรงบิดเพิ่มขึ้นตาม load ที่เพิ่มขึ้นนั้น ทำให้อัตราความเร็วที่เปลี่ยนไปตามการเปลี่ยนของ load มีค่าคงที่ ที่สอดคล้องกับการเพิ่ม load นั้น ๆ หรือกล่าวง่าย ๆ ก็คือว่า เมื่อมอเตอร์ได้รับ load มากขึ้นนั้น แทนที่จะมีความเร็วลดลงไปก็กลับกลายเป็นว่ามีความเร็วเพิ่มขึ้นมาเท่าเดิมตามที่ load เพิ่มขึ้น ดังนั้น มอเตอร์ชนิดนี้จึงต้องการนำไปใช้กับ load ที่ต้องการให้มีความเร็วคงที่มาก ๆ ในขณะที่ load เพิ่มมากขึ้นแต่มอเตอร์ชนิดนี้มีข้อเสียตรงที่ว่า เมื่อได้รับ load มากเกินไป ย่อมทำให้สนามแม่เหล็กอ่อนลงไปมาก นั่นคือความเร็วของมอเตอร์ ก็ไม่อาจคงที่ได้อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ๆ อย่างไม่มีเสถียรภาพ (instability) และทำให้มอเตอร์วิ่งเกินเลยไป ซึ่งจะทำให้ความเสียหายกับมอเตอร์

ในการทำให้มอเตอร์เริ่มหมุน ต้องทำการลัดวงจรสนามอนุกรม ทั้งนี้เพราะขณะเริ่มงาน มอเตอร์กินกระแสไฟมาก ดังนั้นสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสนามอนุกรมอาจมีค่ามากกว่าค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสนามขานาน ซึ่งจะทำให้มอเตอร์หมุนผิดทิศทางได้

11.4 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของมอเตอร์ (Comparison of Motor Characteristics) เครื่องกลไฟฟ้าที่มีโครงสร้างโครงสร้างเดียวกันนั้น ย่อมมี magnetisation curve อันเดียวกัน แม้ว่าเครื่องกลไฟฟ้านั้นจะเป็นมอเตอร์แบบ ขนาน อนุกรม หรือผสมก็ตาม สมมติว่ามอเตอร์ตัวนี้มีพิกัด (rated) ของแรงเคลื่อนไฟ กระแสอาร์มาเจอร์ความเร็ว และแรงบิดเหมือนกัน ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นได้ว่า คุณลักษณะประจำตัวของมอเตอร์ที่มีโครงสร้างชุดเดียวกันนี้ มีความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์แต่ละแบบได้ดังรูป 11.4(a) รูปนี้เป็นการแสดงการเปรียบเทียบลักษณะประจำตัวของมอเตอร์ทั้ง 3 ชนิดนี้ โดยดูจากคุณลักษณะระหว่างแรงบิด (Torque) กับกระแสอาร์มาเจอร์ ก็ได้จากรูป 11.4(b) เช่นกัน



11.4 การเปรียบเทียบคุณลักษณะระหว่างแรงบิด และความเร็วของมอเตอร์ที่มีโครงสร้างตัวเดียวกัน แต่มีการต่อเป็นแบบต่าง ๆ

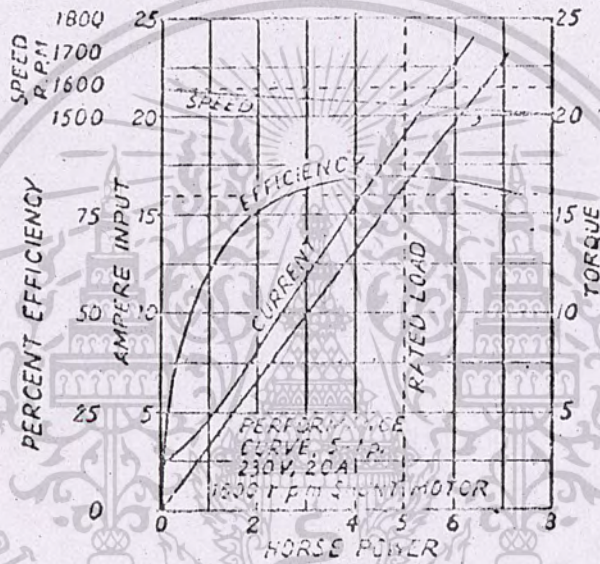
12 PERFORMANCE CURVE คือเส้นกราฟ หรือ curve ที่แสดงคุณลักษณะ

ประจำตัวต่าง ๆ ของมอเตอร์แต่ละแบบ โดยแสดงความสัมพันธ์ต่าง ๆ เหล่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ
 นั้น เปรียบเทียบกับกำลังม้าที่มอเตอร์จ่ายออกมา อาทิเช่นความเร็วกับแรงบิด
 ไม่วารณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพกับแรงม้า... เป็นต้น ในที่นี้จะกล่าวแยกไปตามแบบของมอเตอร์ที่ใช้ดังนี้

12.1 มอเตอร์แบบขนาน (Shunt Motor) มอเตอร์แบบนี้มีคุณลักษณะประจำตัวที่สำคัญ ๆ อยู่ 4 อย่างคือ แรงบิด กระแส ความเร็ว และประสิทธิภาพ ลักษณะประจำตัวของแต่ละตัวเหล่านี้ต่างก็ plot กับกำลังม้าที่มอเตอร์ส่งออกไปดังรูป 12.1



รูป 12.1 Performance curve ของมอเตอร์แบบขนาน

จากรูป พบว่าในขณะที่มอเตอร์ไม่ได้รับภาระทางกล (mechanical load) นั้น จะมีค่าความเร็วที่ค่า ๆ หนึ่ง และความเร็วของมอเตอร์จะไม่วิ่งเตลิดไป (run away) จากความเร็วปกติ เมื่อทำการตัดภาระทางกลออกไปทันที อย่างไรก็ตาม ความเร็วของมอเตอร์ขณะไม่มีภาระ และขณะมีภาระเต็มๆ นั้น ไม่ได้แตกต่างกันไปมากนัก ฉะนั้นจึงถือว่ามอเตอร์แบบนี้มีความเร็วคงที่ อย่างไรก็ตาม ความเร็วในช่วงที่นำไปใช้งานนี้ สามารถปรับให้เร็วได้โดยการต่อ ค.ต.ท. อนุกรมเข้ากับสนามขนาน (Shunt field)

เส้นกราฟที่แสดงประสิทธิภาพของเครื่องนั้น ปกติแล้วจะมีรูปร่างเหมือนกันทั้งของเครื่องกำเนิดไฟ และมอเตอร์ และจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด รูปร่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าของ curve นี้ เปลี่ยนแปรไปตามความประสงค์ของผู้ออกแบบ เส้นกราฟนี้ มิได้รวมการแก้ไขใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เป็นเส้นที่แบนราบพอควร แต่ก็มักจะมีการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพเล็กน้อย ในช่วงของ load ระหว่าง 25% ถึง 50% ส่วนจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุดนั้น จะเป็นจุดที่ให้อยู่ใกล้ ๆ กับช่วงที่ให้ได้รับ load เต็มที่เท่าที่จะทำได้

จากรูปพบว่า มอเตอร์จะกินกระแสไฟจำนวนหนึ่งในขณะที่มอเตอร์ยังไม่จ่าย load ออกไป ทั้งนี้เพราะต้องนำกำลังไฟจำนวนหนึ่งไปจ่ายให้ส่วนสูญเสียกำลังที่คงที่นั่นเอง

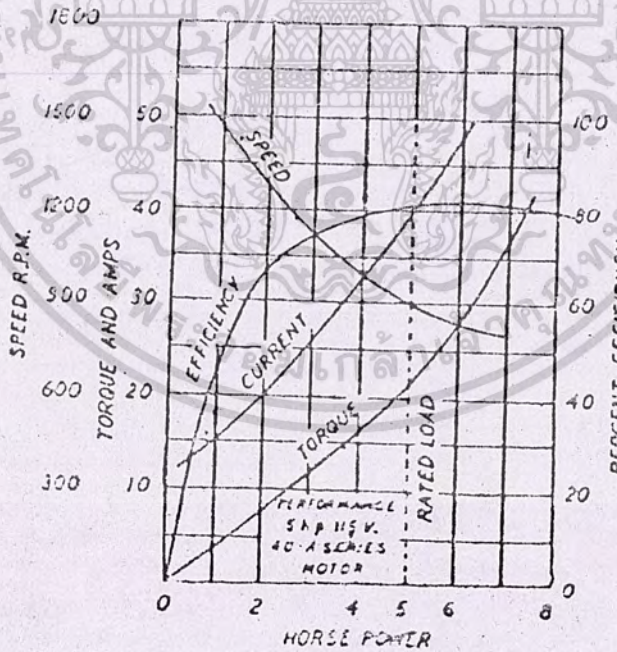
ในการใช้มอเตอร์ ให้เริ่มหมุน (Starting) ภาระหรือ load ของมอเตอร์แบบนี้ จะพบว่ามอเตอร์แบบขนานนี้ มีแรงเริ่มหมุนต่ำกว่ามอเตอร์แบบอื่น (มอเตอร์แบบอนุกรมหรือแบบผสม) นั่นคือมีแรงเริ่มหมุนต่ำ ซึ่งไม่ได้หมายความว่า มอเตอร์แบบขนานนี้จะไม่สามารถเริ่มหมุนภาระทางกลที่หนัก ๆ ได้ แต่หมายความว่า มอเตอร์แบบอนุกรม และแบบผสมนั้นสามารถที่จะทำให้ภาระทางกลที่หนัก ๆ หมุนได้ โดยที่กินกระแสไฟขณะที่ทำให้เริ่มหมุนน้อยกว่าเมื่อเป็นแบบ shunt มอเตอร์ นั่นก็คือ การเสื่อมราคาของมอเตอร์แบบขนานจะมีการเสื่อมราคามากกว่า ถ้าหากว่านำไปใช้ในการหมุนภาระที่หนัก ๆ ในขณะเริ่มแรกตัวอย่าง เช่น ถ้ามอเตอร์แบบขนานต้องเริ่มหมุนภาระที่มีขนาดเป็น 2 เท่าของแรงบิดตามพิกัดของมอเตอร์แบบของอนุกรมนั้นจะปรากฏว่า กระแสที่ใช้จะมีค่าประมาณเพียง 1.5 เท่าของกระแสที่พิกัด ($\propto T \propto I^2$)

12.2 มอเตอร์แบบอนุกรม (Series motor) performance curve ของมอเตอร์แบบนี้ ก็คือ มี curve ต่าง ๆ ในทำนองเดียวกับ performance curve ของแบบ shunt motor นั้นเอง แต่มอเตอร์ระบอนุกรมนั้น จะมีเส้นกราฟแสดงให้เห็นชัดว่า ความเร็วจะลดลงอย่างมากเมื่อต้องจ่ายกำลังมี้ออกไปมาก ส่วนในขณะที่ไม่ได้จ่ายแรงม้า นั้นความเร็วของมันจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเปรียบเทียบกับตอนที่ต้องจ่ายกำลังไฟเต็มที่ นั่นคือความเร็วจะไม่คงที่และจะเปลี่ยนไปมาก เมื่อต้องจ่ายกำลังกลมากจะนั้น จึงไม่นิยมใช้กับ load ที่ต้องการให้มีค่าความเร็วคงที่หรือค่อนข้างสม่ำเสมอ

สำหรับกระแสค่าหนึ่ง ที่มอเตอร์แบบนี้ใช้ในการทำให้เริ่มหมุน (Starting) นั้นจะปรากฏว่า ให้แรงบิดเริ่มแรกมากกว่ามอเตอร์แบบขนานที่ค่ากระแสเดียวกันนี้ ดังนั้น จึงนิยมใช้ ในกรณีที่ต้องการลด load เริ่มแรกที่หนัก ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ทางปัญญา เพื่อวัตถุประสงค์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางธุรกิจไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่นรถประจำถนน (Street car) cranes hoist เป็นต้น จากการที่มอเตอร์แบบนี้ มีแรงบิดเริ่มแรกมากมาย ดังนั้น จึงเป็นเอกลักษณ์หรือข้อดีเด่นของมอเตอร์ชนิดนี้ สำหรับงานลุดลาก (traction work) เช่นพวกรถดีเซลราง เป็นต้น มอเตอร์นี้ เมื่อได้รับ load มากขึ้น ย่อมทำให้ความเร็วลดไป (∵ E_b ลดด้วย) นั่นคือแรงบิดเพิ่มมากขึ้น โดยที่ให้กระแสเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่ถ้าหากว่าใช้มอเตอร์ชานแทนในงานเช่นนี้ ย่อมทำให้ต้องใช้กระแสเพิ่มขึ้นจำนวนมากมาย เพื่อให้ได้แรงบิดที่เพิ่มมากขึ้นด้วยจำนวนที่เท่ากัน ทั้งนี้เพราะมอเตอร์แบบชานมีความเร็วค่อนข้างคงที่ และแรงบิดก็เป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแส ($T \propto I_a$) แต่มอเตอร์แบบอนุกรมนั้น แรงบิดเป็นสัดส่วนกับกำลังสองกระแส ($T \propto I_a^2$) ดังนั้น เมื่อนำมอเตอร์แบบอนุกรมไปใช้กับ street car จะปรากฏว่าพิกัดหรือ rating ของมอเตอร์แบบนี้จะน้อยกว่าแบบ shunt มอเตอร์ เมื่ออยู่ในภาวะที่ได้รับ load เช่นเดียวกัน



รูป 12.2 Performance curve ของมอเตอร์แบบอนุกรม (Series Motor)

จะเห็นได้ว่า ข้อแตกต่างของมอเตอร์แบบอนุกรมกับมอเตอร์แบบชาน

ตามที่ได้อธิบายไปใน performance curve นั้น จะมีข้อแตกต่างกันมากที่เส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ร่วมเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 กราฟของความเร็วจากมอเตอร์ทั้ง 2 แบบดังรูป 12.1 และรูป 12.2 ส่วน
 ไม่สามารถใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการแก้ไข

เส้นกราฟหรือ curve ของประสิทธิภาพ, กระแสและแรงบิด เมื่อเปรียบเทียบ
กับกำลังม้าที่ส่งออกมา ต่างก็มีลักษณะคล้ายคลึงกัน ดังรูป 12.1 และรูป 12.2

13 การเปรียบเทียบของมอเตอร์แบบขนานกับแบบอนุกรม. (Comparison of Shunt and Series Motor)

1 มอเตอร์ขนาน (Shunt Motor) คุณสมบัติประจำตัวของมอเตอร์แบบนี้
นี้ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้น (11.1) แล้ว ซึ่งพอสรุปได้ดังนี้

ก) มอเตอร์แบบนี้ถือว่ามีความเร็วคงที่อย่างพอเพียงในการใช้งาน

ข) แรงบิดเริ่มแรก (starting torque) ของมอเตอร์แบบนี้ ไม่สูง
เหมือนกับมอเตอร์แบบอนุกรม เมื่อเปรียบเทียบในกรณีที่ต้องกินกระแสไฟเท่า ๆ
กัน

จากเหตุผลในข้อ ก) และ ข) ของมอเตอร์แบบนี้ จึงเห็นทางในการนำมอ
เตอร์แบบนี้ไปใช้งานคือ

i) ใช้กับงานที่ต้องการให้มีความเร็วคงที่โดยประมาณ จากช่วงที่ไม่ได้
รับภาระทางกล จนถึงช่วงที่ได้รับภาระทางกลเต็มที่ (Full load)

ii) เมื่อต้องการนำไปหมุนหรือไปขับ load ใด ๆ ที่ความเร็วต่าง ๆ กัน
โดยที่แต่ละความเร็วนั้นก็คงที่อยู่กับงานแบบหนึ่ง เป็นเวลานานเท่าที่ต้องการใช้
กับงานชนิดนั้น ดัง เช่น นำไปใช้กับเครื่องกลึง ซึ่งต้องการให้ความเร็วในการ
กลึงหรือตัดโลหะแต่ละชนิดที่ความเร็วคงที่ที่แตกต่างกัน จนกว่าจะสำเร็จเป็น
งาน ๆ ไป ในกรณีเช่นนี้ มอเตอร์แบบขนานนี้ เหมาะที่จะนำมาใช้กับงานชนิด
นี้ ทั้งนี้เพราะสามารถทำการควบคุมความเร็วที่ค่าต่าง ๆ ที่มอเตอร์ได้อย่าง
เหมาะสมกับลักษณะของงานแต่ละอย่าง รวมทั้งยังง่ายและประหยัดดีในการขึง
คีมมอเตอร์ด้วย

2) มอเตอร์อนุกรม (Series Motor) คุณสมบัติต่าง ๆ ของมอเตอร์
ชนิดนี้ได้กล่าวไว้แล้วในตอนต้นเช่นกัน คือในตอนต้นที่ 11.2 ดังนั้นจึงสรุปคุณสมบัติ
ที่สำคัญเพื่อนำไปใช้งาน และเพื่อให้เห็นข้อแตกต่างกับมอเตอร์แบบขนานได้ดังนี้
คือ

ก) มีแรงบิดเริ่มแรกสูงมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีหน้าที่เปลี่ยนแปลงแก้ไข และปรับปรุงอย่างต่อเนื่องเอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของ

จนเป็นอันตรายกับตัวมอเตอร์เองเมื่อมี load ต่ำมาก

ดังนั้นมอเตอร์แบบนี้จึงมักนำไปใช้งานดังต่อไปนี้

i) เมื่อต้องการใช้แรงบิดสูง ๆ เช่นใช้ในการขับ hoist cranes รถราง (trams) เป็นต้น

ii) เมื่อมอเตอร์สามารถต่อโดยตรงกับ load อาทิเช่น พัดลม ซึ่งความเร็วจะเพิ่มขึ้นได้ก็ต่อเมื่อแรงบิดเพิ่มขึ้น

iii) ในกรณีที่ load นั้น ไม่จำเป็นต้องให้ความเร็วคงที่เมื่อได้รับ load มากขึ้น ซึ่งเป็นตัวทำให้ความเร็วลดลงไปนั้น กลับกลายเป็นข้อดีของมอเตอร์อีกด้วยเพราะว่ามอเตอร์จะไม่กินไฟเพิ่มขึ้นมากทั้ง ๆ ที่แรงบิดหรือ torque นั้น ต้องใช้มาก ดังตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการให้แรงบิดเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า กลับปรากฏว่ากำลังไฟที่มอเตอร์ต้องการเพิ่มขึ้นนั้นเป็นแค่เพียง 50 ถึง 60 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ($\therefore I_a \propto \sqrt{P}$)

iv) มอเตอร์แบบอนุกรมนี้ไม่ควรนำไปใช้กับ load ที่มีโอกาสจะเกิดค่า load น้อย ๆ ขึ้นมา ดังนั้นจึงไม่ควรนำไปใช้กับปั๊มชนิดศูนย์กลาง (Centrifugal pump) หรือขับ load ชนิดที่ใช้สายพานเป็นตัวจุด เป็นต้น

2.14 ประสิทธิภาพและการสูญเสียต่างๆ (Losses and Efficiency)
การสูญเสียย่อมเกิดขึ้นกับเครื่องจักรกลทุกชนิด ในกรณีที่เป็นมอเตอร์นี้ การสูญเสียที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ก็เหมือน ๆ กับที่เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ดงที่กล่าวไปแล้วในตอนต้นเช่นกัน การสูญเสียต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเหล่านี้มี

ก) การสูญเสียกำลังไปในขดลวดทองแดง (copper losses)

ข) การสูญเสียกำลังไปในทางแม่เหล็ก (Magnetic losses)

ค) การสูญเสียกำลังไปในทางกล (Mechanical losses)

สำหรับกรณีที่ จะเกิดภาวะของกำลังสูงสุดขึ้นในมอเตอร์นั้น หาได้โดยหลักการเดียวกับที่กล่าวไปแล้วในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า นั่นคือ

$$I_a R_a = V/2 = E_b$$

เช่นเดียวกัน สำหรับสภาพของการเกิดประสิทธิภาพสูงสุด (maximum efficiency) นี้ เกิดขึ้นเมื่อการสูญเสียกำลังไฟฟ้ในขดลวดทองแดงที่อาร์-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปเผยแพร่
มาเจอร์ (armature copper losses) มีค่าเท่ากับการสูญเสียที่คงที่
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารนี้ทุกครั้งนำไปใช้

(constant losses) ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในเรื่องของเครื่องกำเนิดไฟ

2.15 ลำดับชั้นกำลังต่าง ๆ ของมอเตอร์ (power Stages) ก็คือชั้นต่าง ๆ ของการเปลี่ยนแปลงพลังงานของมอเตอร์ ซึ่งมีทั้งพลังงานที่มอเตอร์ได้รับ กำลังที่สูญเสียไปในส่วนต่าง ๆ และอื่น ๆ ดังรูป 12.5

| ก | | ข | | ค |
|------------|-------------------|-------------------|---------------------|-------------------|
| กำลังไฟ | | กำลังขับ | | กำลังที่ |
| มอเตอร์ | กำลังที่สูญเสียไป | ที่เกิดขึ้น | กำลังที่สูญเสียไปใน | มอเตอร์ส่ง |
| ได้รับ | ที่ขดลวด | ที่อาร์มาเจอร์ | แกนและการ | ออกมา |
| VI (watts) | ทองแดง | $E_a I_a$ (watts) | เสียดทาน | B.H.P. x 735 = 5W |

รูป 12.5 ลำดับชั้นกำลังของมอเตอร์
 ประสิทธิภาพของมอเตอร์ทั้งตัวหรือประสิทธิภาพทางการค้า $\eta_c = \frac{ค}{ก}$
 (Overall or Commercial efficiency)

บทที่ 2

การออกแบบและการทดสอบมอเตอร์

ก่อนอื่นต้องตัดสินใจว่าจะใช้มอเตอร์ชนิดใด โดยพิจารณาจากคุณสมบัติของมอเตอร์ แต่ละชนิด ดังต่อไปนี้

- มอเตอร์ชนิดวงจรถั่วแม่เหล็กอนุกรม มอเตอร์ชนิดนี้จะต่อวงจรถั่วแม่เหล็กอนุกรมกับอเมเจอร์ ดังนั้นขนาดของขดลวดของวงจรถั่วแม่เหล็กจะมีขนาดใหญ่พอที่จะรับค่า กระแสเต็มพิกัดของมอเตอร์ได้ เมื่อพื้นที่ขดลวดถูกจำกัดอยู่จากการออกแบบ วงจรชนิดนี้จะมีจำนวนรอบขดลวดที่ไหลต่ำกว่ากระแสผ่านน้อย ค่าของปฏิกิริยาแม่เหล็กจะน้อยกว่า ให้ความเร็วรอบสูง ซึ่งบางครั้งมีขณะไว้ไหลลดความเร็วรอบจะเร่งขึ้นสูงมากจนเกินพิกัดทางกลศาสตร์ที่มอเตอร์สามารถรับได้ มอเตอร์ชนิดนี้มีสมบัติแรงบิดขณะเริ่มสตาร์ทสูง การปรับค่าความเร็วรอบทำได้โดยการปรับค่าของโวลเตจที่ป้อนสู่อเมเจอร์หรือจัตววงจร แบ่งกระแสในวงจรถั่วแม่เหล็ก

- มอเตอร์ชนิดวงจรถั่วแม่เหล็กขนาน มอเตอร์ชนิดนี้ต่อวงจรถั่วแม่เหล็กขนานกับ อเมเจอร์ ขนาดของขดลวดจะเล็กแต่มีการบิดำเหนือบมากทั้งนี้เพื่อให้ค่าความต้านทานรวมสูง เพื่อลดการสูญเสียในวงจรถั่วแม่เหล็ก มอเตอร์ดังกล่าวเมื่อกำหนดให้ค่ากระแสในวงจรถั่วแม่เหล็กคงที่ไว้ มอเตอร์จะมีสมบัติความเร็วเกือบคงที่ด้วยไม่ว่าไหลจะเปลี่ยนแปลงไป การปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ดังกล่าวสามารถทำได้โดยการปรับค่ากระแสที่ป้อนเข้าวงจรถั่วแม่เหล็ก

- มอเตอร์ชนิดวงจรถั่วแม่เหล็กผสมอาจแยกออกเป็น วงจรต่อชนิดอำนาจแม่เหล็กจากทั้งสองวงจรเสริมกัน (Commutative Compound) ซึ่งใช้กันอยู่ทั่วไป และชนิด อำนาจแม่เหล็กจากสองวงจรที่ต่างกัน (Differential Compound) ซึ่งไม่ใช่เพราะจะเสริมให้เกิดการขาดสมดุล ทางเสถียรภาพของแรงบิดและความเร็วรอบได้ การต่อวงจรผสมยังสามารถต่อได้เป็น ชนิดวงจรถั่วแม่เหล็กขนานหรือวงจรถั่วแม่เหล็กขนานสั้นได้อีกสมบัติของการต่อวงจรถั่วแม่เหล็กผสมนี้จะอยู่ระหว่างวงจรถั่วแม่เหล็กขนานและอนุกรม ซึ่งแล้วแต่การออกแบบว่าจะให้ผลของวงจรมากน้อยเพียงใดจะเห็นได้ว่ามอเตอร์ชนิดวงจรถั่วแม่เหล็กอนุกรม มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการนำไปใช้ในการขับเคลื่อนรถเข็นไฟฟ้า จึงได้ทำการเลือกมอเตอร์ชนิดนี้จากภาควิชา ซึ่งจากผลการพิจารณาโครงสร้างและรูปร่างลักษณะภายนอกแล้วพบว่ามอเตอร์อยู่สองตัวที่อาจนำมาใช้งานได้จึงนำมาทดสอบ โดยในขั้นแรกทำการทดสอบที่ 24 โวลต์ ภาวะ no load ได้ผลดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | แรงดัน (V) | กระแส (A) |
|-----------------|------------|-----------|
| มอเตอร์ตัวที่ 1 | 24 | 8 |
| มอเตอร์ตัวที่ 2 | 24 | 6.3 |

ที่ภาวะไว้ไหลต้วทั้งสองกับกระแสที่น้อยกว่า แสดงว่ามีประสิทธิภาพดีกว่าตัวที่ 1 จึงนำตัวที่ 2 มาทดสอบหาประสิทธิภาพอย่างละเอียดอีกที ซึ่งได้ผลตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1

| แรงดัน (V) | กระแส (A) | SPEED (rpm) | W_2 (g) | W_1 (g) |
|------------|-----------|-------------|-----------|-----------|
| 25.6 | 9.5 | 1530 | 500 | 250 |
| 25.2 | 11 | 1300 | 750 | 250 |
| 24.8 | 12.5 | 1100 | 1000 | 250 |
| 24.2 | 13.7 | 930 | 1250 | 250 |
| 24 | 15 | 860 | 1500 | 250 |
| 23.5 | 16 | 700 | 1750 | 250 |
| 21.2 | 17 | 610 | 2000 | 250 |
| 22.8 | 17.8 | 510 | 2250 | 250 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2

| P_e (VA) | T_m (N-m) | w (rad/s) | P_m (watt) | eff (%) |
|------------|-------------|-------------|--------------|---------|
| 243.2 | 0.2 | 195.8 | 40.7 | 16.7 |
| 277.2 | 0.41 | 136.1 | 55.8 | 20.13 |
| 310 | 0.62 | 115.1 | 71.36 | 25.0 |
| 331.5 | 0.83 | 97.3 | 80.76 | 24.36 |
| 360 | 1.04 | 90.03 | 93.65 | 26 |
| 376 | 1.25 | 73.3 | 91.25 | 24.2 |
| 394.4 | 1.46 | 63.87 | 93.25 | 23.6 |
| 405.8 | 1.66 | 53.4 | 88.64 | 19.33 |

หมายเหตุ: $r = 2.5$ cm

$$T_m = 9.81(W_2 - W_1) r$$

จากการทดสอบพบว่า มอเตอร์ตัวนี้มีประสิทธิภาพต่ำเกินไป ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ขับเคลื่อนรถคนพิการ จึงให้จัดหามอเตอร์ตัวใหม่ โดยได้รับความอนุเคราะห์จาก อ. นิลิต ลอยอง ซึ่งสังเกตุจากขดลวด และชุดคอมมิวเตเตอร์ซึ่งมีสภาพดี จึงนำมอเตอร์ดังกล่าวมาทดสอบ และได้ผลตามตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4

| แรงดัน (V) | กระแส (A) | W_2 (g) | N (rpm) | T_m (N-m) | P_e (VA) | P_m (watt) | eff (%) |
|------------|-----------|-----------|-----------|-------------|------------|--------------|---------|
| 12 | 12 | 1000 | 770 | 0.62 | 144 | 50 | 34.7 |
| 12 | 15 | 1500 | 580 | 1.04 | 186 | 63.3 | 35.1 |
| 18 | 10 | 500 | 2127 | 0.2 | 180 | 46.3 | 25.8 |
| 18 | 13.5 | 1000 | 1555 | 0.62 | 243 | 101.8 | 41.9 |
| 18 | 16 | 1500 | 1260 | 1.04 | 288 | 137.2 | 47.66 |
| 18 | 18 | 2000 | 1060 | 1.45 | 324 | 161 | 49.69 |
| 24 | 14 | 1000 | 2230 | 0.62 | 336 | 146 | 43.45 |
| 24 | 19.5 | 2000 | 1590 | 1.45 | 468 | 241.5 | 51.6 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ : รัศมีของ pulley = 8.5 cm

$$T = 9.81(W_2 - W_1)r, W_1 = 250 \text{ ๘}$$

จากผลการทดสอบจะเห็นว่า ประสิทธิภาพของมอเตอร์จะยอมรับได้ และเมื่อเทียบกับตัวเก่าแล้วจะมีประสิทธิภาพเหนือกว่า จึงตัดสินใจนำมอเตอร์ตัวนี้มาใช้ขับเคลื่อนรถขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและการตัดแปลงตัวรถ

การตัดแปลงโครงรถ ได้มีการปรับปรุงรูปร่างของรถต้นแบบ เพื่อความเหมาะสม โดยจากโครงสร้างแบบเก่า รถขึ้นสำหรับคนพิการแบบนี้จะเป็นแบบที่จับเก็บได้เพื่อความสะดวกต่อการเคลื่อนย้าย แต่เนื่องจากงานแบบนี้จับเก็บได้ ไม่อำนวยความสะดวกในการทำงานของระบบขับเคลื่อนแบบเวลา จึงได้มีการปรับปรุงโครงสร้างของตัวรถใหม่โดยใช้งานแบบจับไม่ได้ เชื่อมติดเข้าไปแทนงานแบบจับได้ ดังรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับโครงการในส่วนอื่น ๆ ยังใช้ของเดิม ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่แข็งแรงและเหมาะกับการใช้งานอยู่แล้ว แต่มีสิ่งที่เป็น เดิมขึ้นมาคือ ถ่านที่ใช้วาง Motor ที่ใช้ขับเคลื่อน และ Motor ตัวที่ใช้ในการ เลี้ยว จะใช้แผ่นเบกกาไลก์ เพื่อความแข็งแรงทนทานและยังมีน้ำหนักเบาอีกด้วย

• ระบบการส่งกำลัง ระบบขับเคลื่อนของรถคนใช้ไปฟ้าคันนี้ ใช้ระบบ เบลลา-โซ่ ทั้งนี้เนื่องจากว่าเป็นระบบที่เทียบกับระบบอื่นๆ เช่น ระบบสายพาน ระบบ เพื่องกดโดยตรง จะเห็นได้ว่าเป็นระบบที่คุ้มค่า และประหยัดที่สุด แม้ว่าจะไม่ได้ ประสิทธิภาพดีที่สดก็ตาม ซึ่งการติดตั้งระบบขับเคลื่อนนี้ ก็ต้องมีการตัดแปลงจากของ เดิมมาก ทั้งนี้เนื่องจากระบบเดิมเป็นระบบแบบไม่มีเพลากลาง

อุปกรณ์ที่ใช้

เพลากลางสนั่นเลสขนาด

6 ทน

baring พร้อมปลอกจืด (เต็กดำ) ขนาด

6 ทน

gearbox ขนาดเพื่องกด 1/60

1 ชุด

โซ่ขนาด 4 ทน

1 เส้น

เพื่อง gear ขนาด 4 นิ้ว 22 ฟัน

1 ชุด

เพื่อง gear ขนาด 2 นิ้ว 12 ฟัน

1 ชุด

coupling motor - gearbox

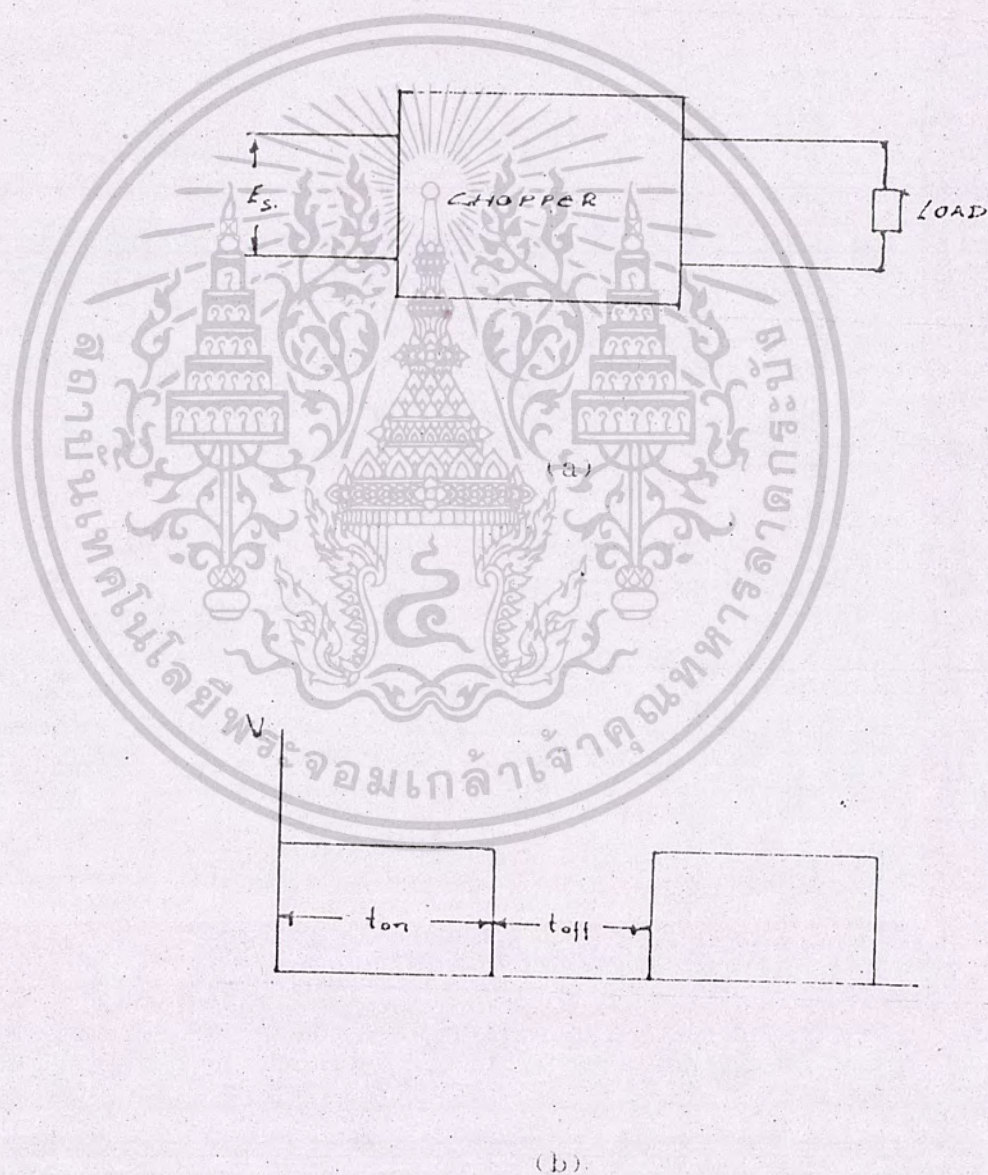
1 ตัว

และมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนนี้ จะเป็น D.C. motor - แบบ series ซึ่งได้รับการทดสอบแล้วว่าใช้งานได้จริง และต้องนำมาทำความสะอาดด้วย ทรายทั้งหมดที่กล่าวมานี้ ยึดอยู่กับ frame เดียวกัน ตีบนแผ่นรถที่ใช้แผ่น เบกกาไลก์เป็นโครง

บทที่ 4

การปรับความเร็ว

การปรับความเร็วของรถเข็นใช้วงจร ชอปเปอร์ โดยการปรับโวลเตจเฉลี่ยที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.1

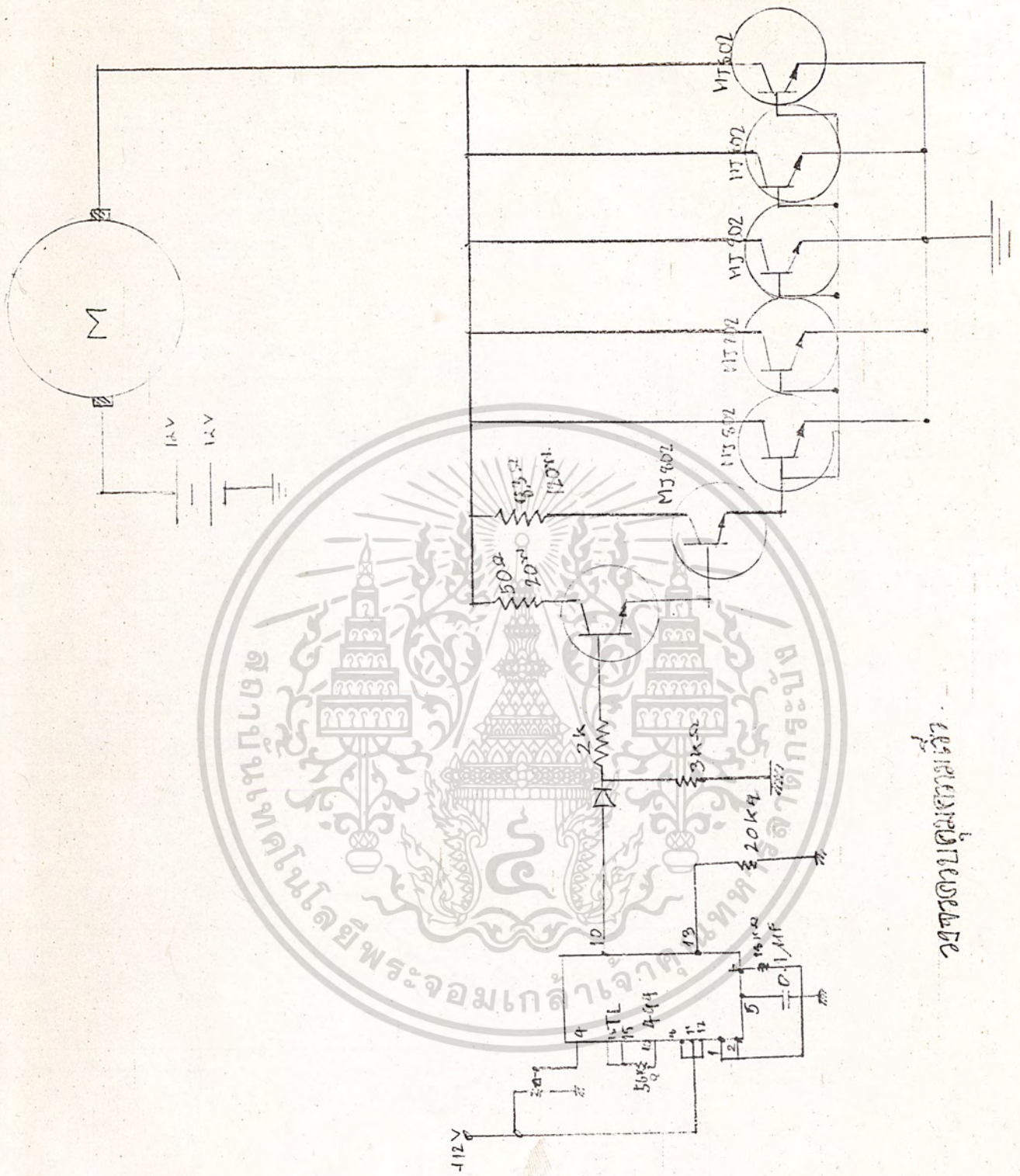


รูปที่ 4.1 a) แสดงการต่อวงจร ชอปเปอร์ ระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากับโหลด

b) แสดงลักษณะโวลเตจตกคร่อมโหลดเมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

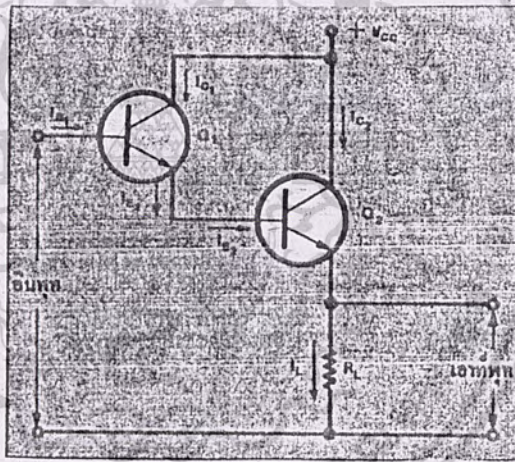


นางสาวบุศมณฑลใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจร ซอปปเปอร์ ที่ใช้ควบคุมความเร็วนั้น แสดงดังรูป 4.3 โดย
วงจรประกอบด้วยสองส่วนคือ

4.1 วงจรดาร์ลิ่งตันประกอบด้วยชุดทรานซิสเตอร์ซึ่งชุดทรานซิสเตอร์
ทำหน้าที่ขยายสัญญาณและเป็นสวิชเปิดวงจร โดยทรานซิสเตอร์ตัวแรกจะทำหน้าที่
ขยายสัญญาณที่ได้รับจากชุดกำเนิดสัญญาณ ให้กับขาเบสของทรานซิสเตอร์ตัวที่ 2 และ
ตัวที่ 2 ก็จะขยายสัญญาณให้กับ 4 ตัวที่เหลือ การต่อทรานซิสเตอร์หลายตัวก็เพื่อให้
สามารถรับกระแสได้มากขึ้นเอง ส่วนความต้านทานที่นำมาต่อไว้ นั้น เพื่อจำกัดกระแส
เข้าขา collector ป้องกันมิให้ทรานซิสเตอร์มีง



รูป ที่ 4.4 วงจรดาร์ลิ่งตัน

วงจรดาร์ลิ่งตันที่ เขียนไว้ในรูปที่ 4.4 ถ้าดูให้ดีก็คือนำวงจรขยายอิมิตเตอร์นั้น
เองโดยใช้ทรานซิสเตอร์สองตัวต่อกัน โดยตัวหลังเป็นโพลดของทรานซิสเตอร์ตัวแรก
การทำงาน

ตามรูป 4.4 ถ้ามีสัญญาณป้อนเข้าวงจรระหว่างเบสของทรานซิสเตอร์
 Q_1 กับกรานต์จะทำให้เกิดกระแสไหลในทิศทางดังรูปที่ 4.4 กระแส I_{C1} จะมี
ค่าเป็น β เท่าของกระแส I_{B1} ($I_{C1} = \beta I_{B1}$) โดย β เป็นอัตรา
ขยายกระแสของทรานซิสเตอร์ Q_2 กระแส I_{B1} และ I_{C1} จะไหลออกจาก
อิมิตเตอร์ไปเข้าเบสของทรานซิสเตอร์ Q_2 เป็นกระแส I_{B2} ดังนั้นเราจึงกล่าวได้ว่า
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{B2} = I_{B1} + \beta_1 I_{B1}$$

$$= (1 + \beta_1) I_{B1}$$

กระแส I_{B2} จะไหลเข้าทางเบสผ่าน R_L ลงกรานต์ ผลของการไหลของ I_{B2} ทำให้เกิด I_{C2} ไหลผ่าน R_L ตามด้วยดังนี้

$$I_L = I_{B2} + I_{C2}$$

$$= I_{B2} + \beta_2 I_{B2}$$

$$= (1 + \beta_2) I_{B2}$$

แต่ $I_{B2} = (1 + \beta_1) I_{B1}$

ดังนั้น $I_L = (1 + \beta_2)(1 + \beta_1) I_{B1}$

ถ้า β มีค่ามากกว่า 10 เราอาจประมาณได้ว่า

$$I_L \approx \beta_1 \beta_2 I_{B1}$$

ข้อนี้เป็นการแสดงให้เห็นว่าวงจรทรานส์ลิ่งตันขยายกระแสได้มากที่สุดที่เดียว

4.2 ส่วนสร้างสัญญาณ

ส่วนสร้างสัญญาณนี้ เราใช้ IC TTL 494 โดยที่เราสามารถปรับทั้งความถี่และ duty cycle ของสัญญาณได้ สัญญาณที่ออกจาก IC TTL 494 จะส่งต่อไปยัง ชุดทรานซิสเตอร์ เพื่อให้ทรานซิสเตอร์ on-off และทำหน้าที่เป็นชอปเปอร์ที่สำคัญคือ เราต้องเลือกความถี่ของสัญญาณให้อยู่ในช่วง ที่ทรานซิสเตอร์สามารถทำงานได้ มิฉะนั้นทรานซิสเตอร์จะ on-off ไม่ทัน

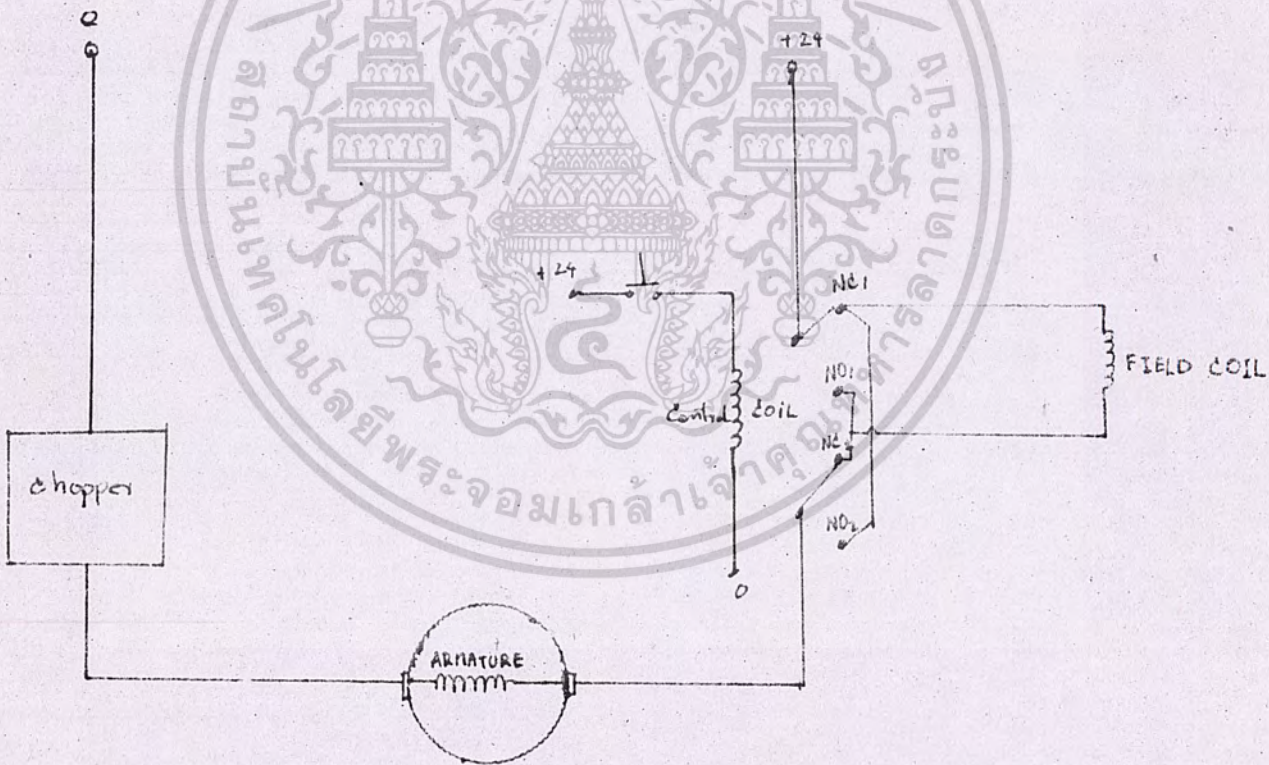
บทที่ 5

ระบบควบคุมการเดินหน้า-ถอยหลังและการเลี้ยว

ระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการ control เนื่องจากระบบขับเคลื่อนนี้ จะต้องใช้มีการเดินหน้า-ถอยหลังได้ด้วย ดังนั้นตามหลักการของ ดีซี มอเตอร์ แล้ว จะต้องมีการกลับทิศทางแม่เหล็ก สนามใดสนามหนึ่ง ระหว่าง field กับ อเมเจอร์ ในที่นี้เลือกกลับขั้วของ ฟิวด์ ดอยด์ ดีกว่าเพราะสะดวกกว่าดังนั้น เราจึงใช้ รีเลย์ มาช่วยในการกลับขั้ว field นี้ โดย รีเลย์ ตัวที่เลือกมาใช้นี้ มีคุณลักษณะคือ

2 NO, 2 NC / 24 VOLT D.C. COIL / 15 A

โดยการทำงานให้ดูตามวงจรในรูปที่ 1 จะแสดงให้เห็นขณะที่ ดอยด์ ไม่มีไฟเลี้ยง หน้าสัมผัส NC1 และ NC2 จะก้าหน้าทำให้ขณะที่ NO1 และ NO2 ไม่ได้ก้าหน้าที่อะไร (วงจรดูในรูป)

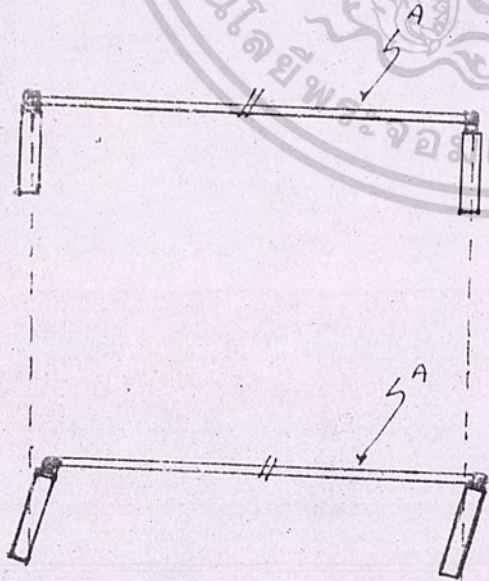


แต่ในขณะที่ คอยล์ มีไปเลียง นั่นคือ เมื่อเราถอดปุ่ม เบียดของหลัง จะทำให้หน้าสัมผัส NO1 และ NO2 ทำงาน ซึ่งก็จะทำให้ทิศทางสนามแม่เหล็กของ field coil กลับทิศไปอีกทิศหนึ่ง ซึ่งจะทำให้ หมอเตอร์เกิดการหมุนกลับทิศได้

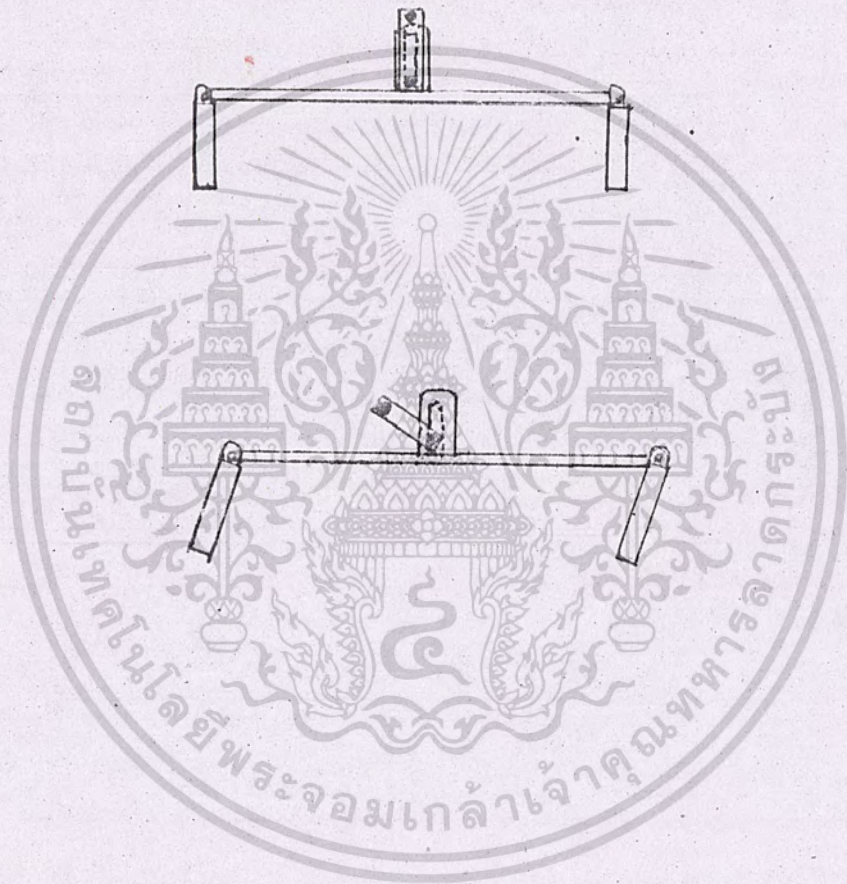
ระบบควบคุมการเลี้ยว

ระบบควบคุมการเลี้ยวเป็นระบบที่ออกแบบยาก และ มีปัญหามากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากการที่เราไม่มีความรู้เพียงพอ ในวิชาเครื่องกล ที่จะอธิบายขั้นตอนการดำเนินงานที่ชัดเจน และแก้ไขมาได้เรื่อยๆ ๑ ดังนั้นการออกแบบจึงต้อง ทำหลายครั้ง ครั้งแรก จะออกแบบการเลี้ยว โดยใช้ระบบ rack and pinion ที่ใช้ในสว่านแบบแท่น และพยายามที่จะตัดข้อเสียดังกล่าวโดยจุดหมุนของข้อเสียด้านหน้า เข้าหากัน ซึ่งดูจากภายนอกแล้วคิดว่าน่าจะเลี้ยวได้ แต่ความจริงแล้วการออกแบบแบบนี้ ไม่สามารถเลี้ยวได้เลย เพราะล้อซ้ายและขวามีรัศมีการเลี้ยวไม่เท่ากัน ทำให้การ เลี้ยวเป็นไปไม่ได้ และจากการที่รัศมีการเลี้ยวไม่เท่ากันนั่นเอง ทำให้แกน rack and pinion ไม่สามารถที่จะใช้หมอเตอร์ขับได้

ต่อมาได้มีการออกแบบให้รัดกุมมากขึ้นโดยการคิดให้จ่ายชั้นเดียวการเลี้ยว มาเปรียบกับล้อเหลี่ยมด้านขนาน ดังรูป



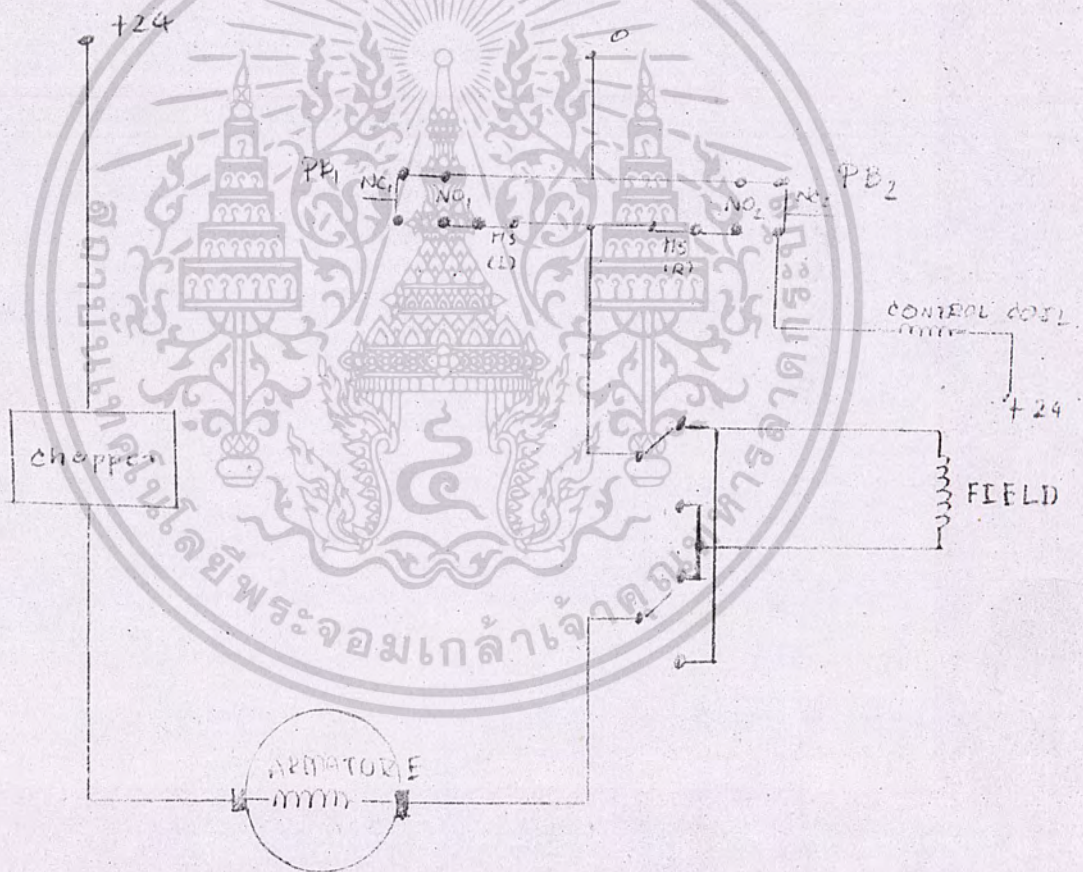
ในกรณีนี้ ล้อซ้ายและขวา จะเลี้ยวในวิธีที่เท่ากันตลอด และตาม A ซึ่งเป็น rigid body ก็ไม่เกิดการยืดตัว ทำให้ผิดคุณสมบัติ และการขับเคลื่อนตาม A ก็ไม่ได้กำหนดแบบ rack and pinion แต่ทำเป็นลักษณะดังรูป



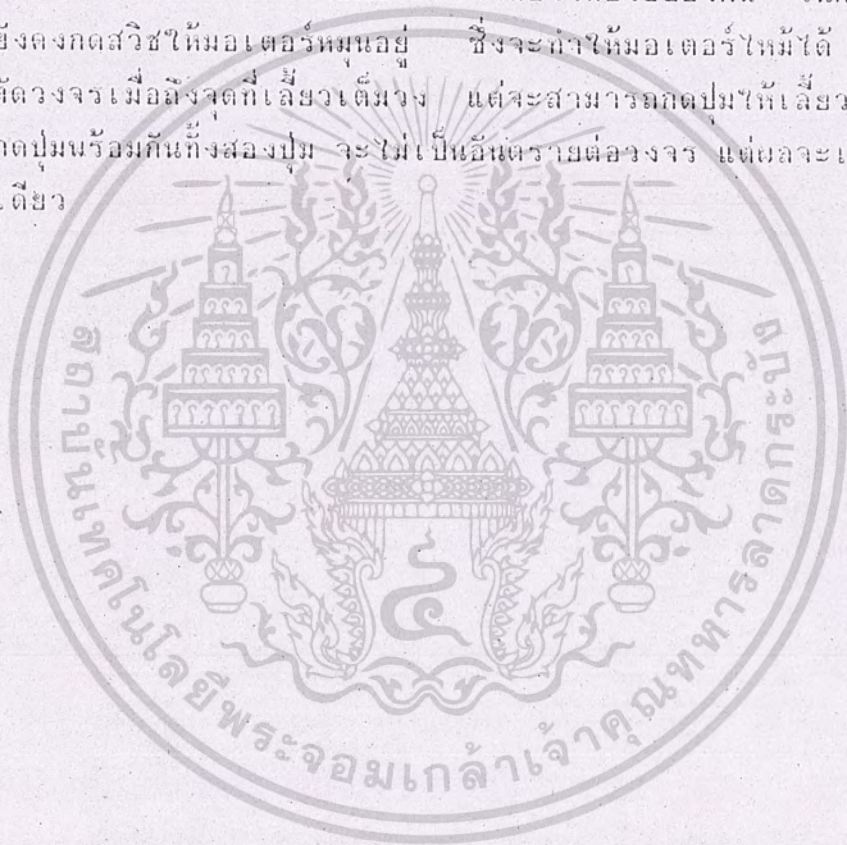
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเว็บไซต์ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะ d เกิดจากรัศมีวงเลี้ยว ซึ่งจะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับว่าเราต้องการเลี้ยวแฉกหรือกว้างขนาดไหน ซึ่งถ้าเลี้ยวกว้าง ค่า d ก็จะน้อย แต่ถ้าเลี้ยวแคบๆ ค่า d ก็จะมาก

ระบบไปป์ที่ใช้ในการควบคุมการเลี้ยว ในการเลี้ยวเราสามารถควบคุมได้โดยการควบคุมการกลับทิศของ มอเตอร์ ซึ่งก็ใช้หลักการเดียวกันกับแบบเดินหน้า-ถอยหลัง แต่การควบคุม ระบบเลี้ยว เราต้องการให้มีปุ่มควบคุม แบบกดติดปล่อยดับ ดังนั้น การควบคุม ดอยด์ ของ รีเลย์ จึงมีข้อแตกต่างกับของแบบเดินหน้า-ถอยหลัง อยู่ที่จำไม่สามารถใช้ สวิตช์ คู่กับ รีเลย์ ได้ ดังนั้นจึงต้องใช้ push button แบบ 2 contact 2 ตัว แทน ซึ่งได้ผลดีเป็นที่น่าพอใจ



จากรูป ถ้าเราไม่กดปุ่มเลย จะไม่มีกระแสไหลผ่านมอเตอร์ มอเตอร์จะไม่หมุน แต่จะมีกระแสไหลผ่านคอยล์ ถ้าเรากดปุ่ม PB1 หน้าสัมผัส NO1จะเป็น close และจะทำให้กระแสไหลผ่านไปยังมอเตอร์ โดยที่ยังมีกระแสไหลใน คอยล์ อยู่ แต่ถ้าเรากดปุ่ม PB2 หน้าสัมผัส NO2 จะเปลี่ยนเป็น close แทน และจะไม่มีกระแสไหลเข้า coil ของ รีเลย์ ทำให้หน้าสัมผัสของ รีเลย์ เปลี่ยนไป ยังผลให้กระแสที่ไหลเข้า field winding กลับทิศ ทำให้มอเตอร์หมุนกลับทิศนอกจากนี้ ยังได้ติดตั้ง ไมโครสวิชไว้ที่ปลายล้อเลี้ยวทั้งสองโดยใช้ป้องกัน ในกรณีที่เลี้ยวเต็มวง แล้วผู้ใช้ยังกดสวิชให้มอเตอร์หมุนอยู่ ซึ่งจะกำให้มอเตอร์ไหม้ได้ ไมโครสวิชนี้จะทำหน้าที่ตัดวงจรเมื่อถึงจุดที่เลี้ยวเต็มวง แต่จะสามารถกดปุ่มให้เลี้ยวไปอีกทางได้และ ในกรณีที่กดปุ่มพร้อมกันทั้งสองปุ่ม จะไม่เป็นอันตรายต่อวงจร แต่จะเหมือนกับกด PB2 เพียงปุ่มเดียว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

การทดสอบสมรรถภาพของรถเข็นไฟฟ้า

ได้นำรถเข็นไฟฟ้าที่ประกอบเสร็จแล้ว มาทดสอบสมรรถภาพ โดยการทดสอบดังต่อไปนี้

1. การทดสอบหาความเร็วที่พื้นผิวต่าง ๆ กันโดยเปลี่ยนน้ำหนักคนนั่งใช้ระยะทางในการวิ่งทางราบ 10 m และวิ่งบนพื้นเอียง 6.5 องศา ระยะ 6.2 m แล้วทำการจับเวลาเพื่อหาความเร็ว ซึ่งได้ผลดังต่อไปนี้

| ชนิดพื้นผิว | ความเร็ว (kph) | | | ประสิทธิภาพ (%) | | |
|---------------------|----------------|------|------|-----------------|----|------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| พื้นกระเบื้องยาง | 3.2 | 3.19 | 3.19 | 37 | 38 | 38 |
| พื้นกระเบื้องเคลือบ | 3.49 | 3.32 | 3.27 | 34.5 | 35 | 35.5 |
| พื้นขรุขระ | 2.93 | 2.81 | 2.76 | 40 | 41 | 43 |
| พื้นเอียง | 2.70 | 2.55 | 2.40 | 43.5 | 45 | 47 |

หมายเหตุ : น้ำหนักรถเข็นพร้อมแบตเตอรี่ 85 kg
 1 น้ำหนักผู้ทำการทดสอบ 55 kg
 2 น้ำหนักผู้ทำการทดสอบ 65 kg
 3 น้ำหนักผู้ทำการทดสอบ 75 kg

หาประสิทธิภาพของมอเตอร์ ได้จากความเร็วของรถ ซึ่งจะหาความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ และนำความเร็วรอบที่ได้ ไปเทียบหาประสิทธิภาพจากข้อมูลการทดสอบมอเตอร์

2. ทดสอบการวิ่งระยะไกล โดยกำหนดระยะรอบละ 300 เมตรแล้วทำการจับเวลา จนกว่ารถมีกำลังตกลง ซึ่งได้ผลดังนี้

| | ความเร็ว (kph) |
|----------------|----------------|
| รอบที่ 1 | 3.3 |
| รอบที่ 2 | 3.1 |
| รอบที่ 3 | 3.03 |
| รอบที่ 4 | 3.3 |
| รอบที่ 5 | 3.27 |
| ความเร็วเฉลี่ย | 3.21 |

หมายเหตุ : การที่ความเร็วไม่ลดลงตามอายุการใช้งานของแบตเตอรี่เพราะเส้นทางการบังคับรถต่างกันย่อมทำให้ความเร็วผิดไป

จากการทดสอบแล้วพบว่า รถเข็นมีความเร็วพอสมควรคือ ขนาดคนเดิน ซึ่งเป็นความเร็วที่เหมาะสมที่จะใช้ในโรงพยาบาลและอายุการใช้งานต่อการชาร์จแบตเตอรี่ 1 ครั้ง ก็สามารถจะยอมรับได้ด้วย

บทสรุปและวิจารณ์

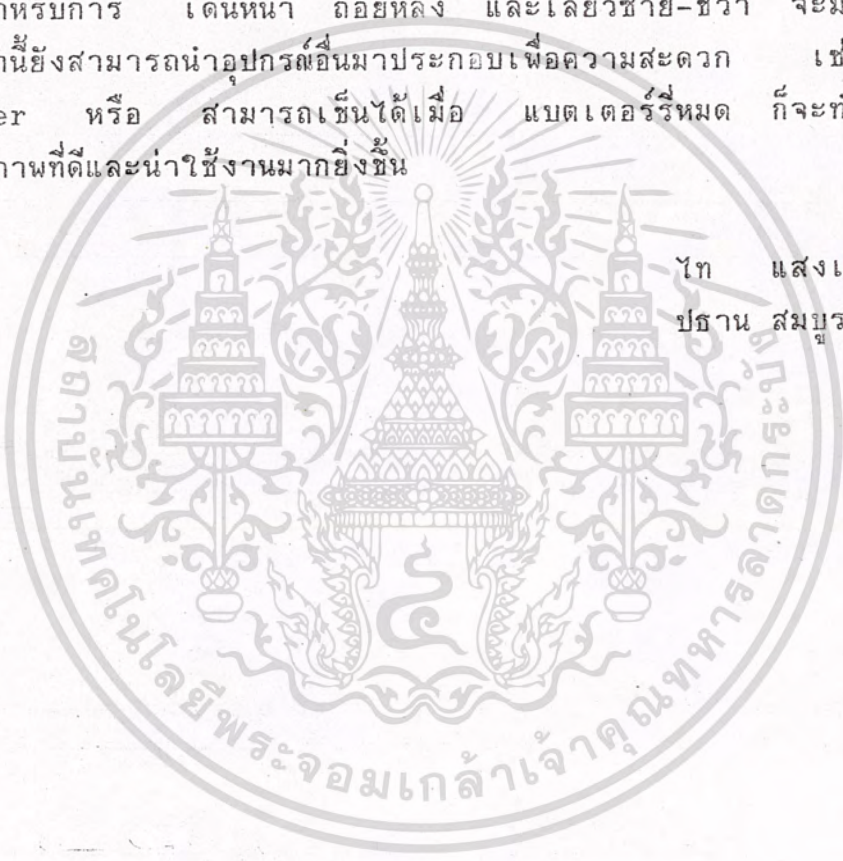
จากการที่ได้ประกอบตัวรถขึ้นและนำมาทดสอบแล้วพบว่า รถเซ็นไฟฟ้ามีสมรรถภาพพอจะยอมรับได้ คือมีความเร็วเฉลี่ยประมาณ 3.21 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นความเร็วขนาดคนเดิน และมีความคล่องตัวพอสมควร รวมทั้งวงเลี้ยวก็ไม่กว้างจนเกินไป ส่วนข้อบกพร่องยังมีอยู่บางจุดเช่น การวิ่งขึ้นเนินเอียงยังมีความเร็วต่ำ เนื่องจากการสูญเสียของระบบส่งกำลัง รวมทั้งการสูญเสียของระบบไฟฟ้า นอกจากนี้ระบบการบังคับรถยังมีความสะดวกไม่เพียงพอ ซึ่งเป็นจุดที่ยังต้องการพัฒนาอีกมาก



ข้อเสนอแนะ

รถเข็นไฟฟ้าคันนี้ ใช้ระบบส่งกำลังโดยการขับล้อเดียว เป็นระบบที่ไม่ดี เพราะการเลี้ยวทั้ง 2 ข้างความเร็วจะไม่เท่ากัน ซึ่งสามารถพัฒนามาใช้ เฟือง ดิฟเฟอเรนเชียล หรืออาจใช้มอเตอร์ 2 ตัวขับข้างละล้อ ก็จะมีประสิทธิภาพดีกว่า ส่วนการบังคับรถนั้นยังมีปุ่มควบคุมมากเกินไป ควรจะใช้ joy stick เพียงอันเดียวสำหรับการ เดินหน้า ถอยหลัง และเลี้ยวซ้าย-ขวา จะมีความสะดวกกว่า นอกจากนี้ยังสามารถนำอุปกรณ์อื่นมาประกอบเพื่อความสะดวก เช่น battery charger หรือ สามารถเข็นได้เมื่อ แบตเตอรี่หมด ก็จะทำให้รถเข็นคันนี้มี สมรรถภาพที่ดีและนำไปใช้งานมากยิ่งขึ้น

ไท แสงเทียน
ประธาน สมบูรณ์



กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ

- อ. ชัยวุฒิ นิตרותัย อาจารย์ภาควิชาไฟฟ้ากำลัง
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ที่ได้ให้คำแนะนำตลอดในการทำโครงการนี้จนสำเร็จไปด้วยดี

- อ. นิธิด ล้ายอง อาจารย์ภาควิชาไฟฟ้ากำลัง
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ที่ให้คำแนะนำและระงับอุปสรรคต่าง ๆ ที่ใช้ในโครงการ

- นาย วิเชียร เกษสุภะพันธ์ ที่ให้คำปรึกษาและกำลังใจมาโดยตลอด

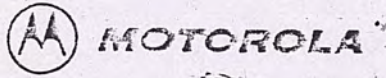
นางสาว เสกขวรัตน์ วัฒนกุล ที่ให้ความช่วยเหลือด้านงานพิมพ์

ไท แสงเทียน
ประธาน สมบูรณ์
1/4/1991

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



TL494

**SWITCHMODE
PULSE WIDTH MODULATION
CONTROL CIRCUITS**

The TL494 is a fixed frequency, pulse width modulation control circuit designed primarily for Switchmode power supply control. This device features:

- Complete Pulse Width Modulation Control Circuitry
- On-Chip Oscillator With Master Or Slave Operation
- On-Chip Error Amplifiers
- On-Chip 5 Volt Reference
- Adjustable Dead-Time Control
- Uncommitted Output Transistors Rated to 500 mA Source Or Sink
- Output Control For Push-Pull Or Single-Ended Operation
- Undervoltage Lockout

**SWITCHMODE
PULSE WIDTH MODULATION
CONTROL CIRCUITS**

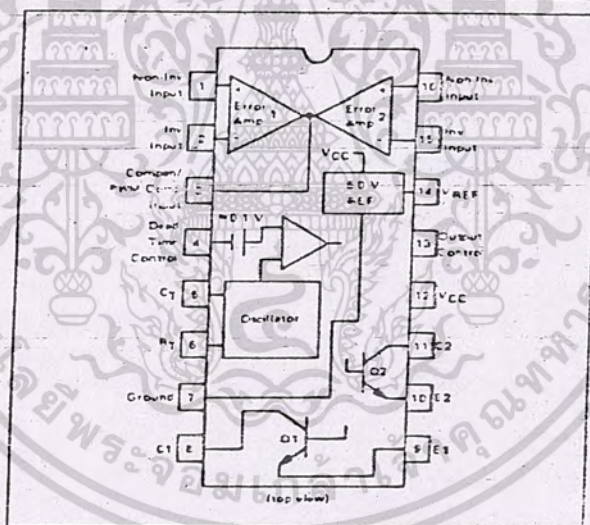
SILICON MONOLITHIC
INTEGRATED CIRCUITS



J SUFFIX
CERAMIC PACKAGE
CASE 620-10



N SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 646-06



The TL494C is specified over the commercial operating range of 0°C to 70°C. The TL494I is specified over the industrial range of -25°C to 85°C. The TL494M is specified over the full military range of -55°C to 125°C.

ORDERING INFORMATION

| Device | Temperature Range | Package |
|---------|-------------------|-------------|
| TL494CN | 0° to 70°C | Plastic DIP |
| TL494CJ | 0° to 70°C | Ceramic DIP |
| TL494IN | -25° to 85°C | Plastic DIP |
| TL494IJ | -25° to 85°C | Ceramic DIP |
| TL494MJ | -55° to 125°C | Ceramic DIP |

MOTOROLA LINEAR/INTERFACE DEVICES

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของ Motorola Inc. การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นการฝ่าฝืนกฎหมายและจะก่อให้เกิดความเสียหายทางกฎหมายได้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494

FIGURE 1 — BLOCK DIAGRAM

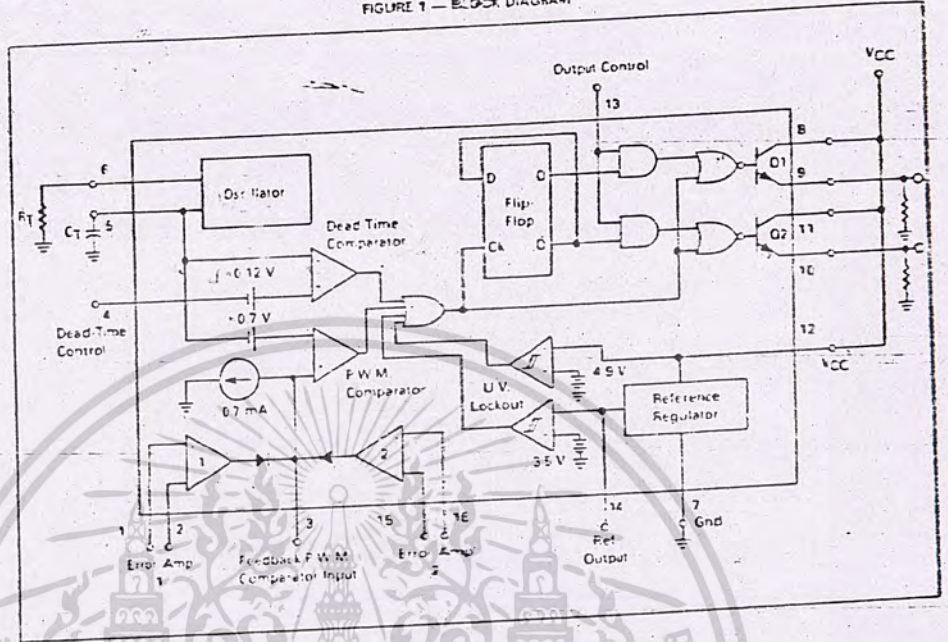
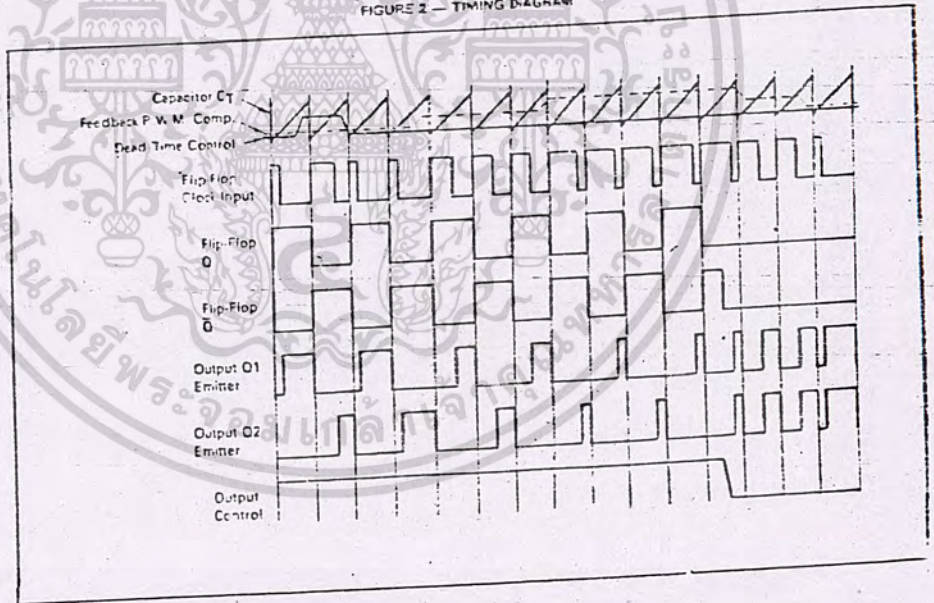


FIGURE 2 — TIMING DIAGRAM



MOTOROLA LINEAR/INTERFACE DEVICES

3-313

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในทางวิชาการเท่านั้น ไม่สามารถนำมาใช้เพื่อการค้า
 ไม้สามารถทำได้ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่นำมาใช้

TL494

Description

The TL494 is a fixed-frequency pulse width modulation control circuit, incorporating the primary building blocks required for the control of a switching power supply. (See Figure 1.) An internal linear sawtooth oscillator is frequency-programmable by two external components, R_T and C_T . The approximate oscillator frequency is determined by:

$$f_{osc} = \frac{1.1}{R_T \cdot C_T}$$

For more information refer to Figure 4.

Output pulse width modulation is accomplished by comparison of the positive sawtooth waveform across capacitor C_T to either of two control signals. The NOR gates, which drive output transistors Q1 and Q2, are enabled only when the flip-flop clock input line is in its low state. This happens only during that portion of time when the sawtooth voltage is greater than the control signals. Therefore, an increase in control-signal amplitude causes a corresponding linear decrease of output pulse width. (Refer to the timing diagram shown in Figure 2.)

The control signals are external inputs that can be fed into the dead-time control, the error amplifier inputs, or the feedback input. The dead-time control comparator has an effective 120 mV input offset which limits the minimum output dead time to approximately the first 4% of the sawtooth-cycle time. This would result in a maximum duty cycle on a given output of 96% with the output control grounded, and 48% with it connected to the reference line. Additional dead time may be imposed on the output by setting the dead-time control input to a fixed voltage, ranging between 0 to 3.3 V.

The pulse width modulator comparator provides a means for the error amplifiers to adjust the output pulse width from the maximum percent on-time established by the dead time control input, down to zero, as the voltage at the feedback pin varies from 0.5 to 3.5 V. Both error amplifiers have a common-mode input range from -0.3 V to $(V_{CC} - 2V)$, and may be used to sense power-supply output voltage and current. The error-amplifier outputs are active high and are ORed together at the non-inverting input of the pulse-width modulator comparator. With this configuration, the amplifier that demands minimum output on time, dominates control of the loop.

When capacitor C_T is discharged, a positive pulse is generated on the output of the dead-time comparator, which clocks the pulse-steering flip-flop and inhibits the output transistors, Q1 and Q2. With the output-control connected to the reference line, the pulse-steering flip-flop directs the modulated pulses to each of the two output transistors alternately for push-pull operation. The output frequency is equal to half that of the oscillator. Output drive can also be taken from Q1 or Q2, when single-ended operation with a maximum on-time of less than 50% is required. This is desirable when the output transformer has a ringback winding with a catch diode used for snubbing. When higher output-drive currents are required for single-ended operation, Q1 and Q2 may be connected in parallel, and the output mode pin must be tied to ground to disable the flip-flop. The output frequency will now be equal to that of the oscillator.

The TL494 has an internal 5 V reference capable of sourcing up to 10 mA of load current for external bias circuits. The reference has an internal accuracy of $\pm 1.5\%$ with a typical thermal drift of less than 50 mV over an operating temperature range of 0 to 70°C.

FIGURE 3 — FUNCTIONAL TABLE

| Input | Output Function | $I_{out} = f_{osc}$ |
|----------------|----------------------------------|---------------------|
| Output Control | | |
| Grounded | Single-ended P.W.M. at Q1 and Q2 | 1 |
| At V_{ref} | Push-pull operation | 0.5 |

TL494

MAXIMUM RATINGS (Full operating ambient temperature range applies unless otherwise noted)

| Rating | Symbol | TL494C | TL494J | TL494M | Unit |
|--|------------------|------------|------------|------------|------|
| Power Supply Voltage | VCC | 42 | 42 | 42 | V |
| Collector Output Voltage | VC1, VC2 | 42 | 42 | 42 | V |
| Collector Output Current (each transistor) (1) | IC1, IC2 | 500 | 500 | 500 | mA |
| Amplifier Input Voltage Range | V _{IR} | -0.3 to 42 | -0.3 to 42 | -0.3 to 42 | V |
| Power Dissipation in T _A = 45°C | P _D | 1000 | 1000 | 1000 | mW |
| Operating Junction Temperature | T _J | | | | °C |
| Plastic Package | | 125 | 125 | — | |
| Ceramic Package | | 150 | 150 | 150 | |
| Operating Ambient Temperature Range | T _A | 0 to 70 | -25 to 85 | -55 to 125 | °C |
| Storage Temperature Range | T _{stg} | | | | °C |
| Plastic Package | | -55 to 125 | -55 to 125 | — | |
| Ceramic Package | | -65 to 150 | -65 to 150 | -65 to 150 | |

NOTE 1: Maximum thermal limits must be observed.

THERMAL CHARACTERISTICS

| Characteristics | Symbol | N Suffix Plastic Package | J Suffix Ceramic Package | Unit |
|---|-----------------|--------------------------|--------------------------|------|
| Thermal Resistance, Junction to Ambient | R _{JA} | 80 | 100 | °C/W |
| Derating Ambient Temperature | T _A | 45 | 50 | °C |

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

| Condition/Value | Symbol | TL494 | | | Unit |
|--|------------------|--------|-------|-----------|------|
| | | Min | Typ | Max | |
| Power Supply Voltage | VCC | 7.0 | 15 | 40 | V |
| Collector Output Voltage | VC1, VC2 | — | 30 | 40 | V |
| Collector Output Current (each transistor) | IC1, IC2 | — | — | 200 | mA |
| Amplifier Input Voltage | V _{in} | -0.3 | — | VCC - 2.0 | V |
| Current into Feedback Terminal | I _{fb} | — | — | 0.3 | mA |
| Reference Output Current | I _{ref} | — | — | 10 | mA |
| Timing Resistor | R _T | 1.8 | 30 | 500 | kΩ |
| Timing Capacitor | C _T | 0.0047 | 0.001 | 10 | μF |
| Oscillator Frequency | f _{osc} | 1.0 | 40 | 200 | kHz |

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (VCC = 15 V, C_T = 0.01 μF, R_T = 12 kΩ unless otherwise noted.)

For typical values T_A = 25°C, for min/max values T_A is the operating ambient temperature range that applies unless otherwise noted.

| Characteristic | Symbol | TL494CJ | | | TL494M | | | Unit |
|----------------|--------|---------|-----|-----|--------|-----|-----|------|
| | | Min | Typ | Max | Min | Typ | Max | |

REFERENCE SECTION

| | | | | | | | | |
|---|---------------------|------|-----|------|------|-----|------|----|
| Reference Voltage (I _O = 1.0 mA) | V _{ref} | 4.75 | 5.0 | 5.25 | 4.75 | 5.0 | 5.25 | V |
| Line Regulation (VCC = 7.0 V to 40 V) | Reg _{line} | — | 2.0 | 25 | — | 2.0 | 25 | mV |
| Load Regulation (I _O = 1.0 mA to 10 mA) | Reg _{load} | — | 1.0 | 15 | — | 3.0 | 15 | mV |
| Short-Circuit Output Current (V _{ref} = 0 V) | I _{SC} | 15 | 25 | 75 | 15 | 35 | 75 | mA |

MOTOROLA LINEAR/INTERFACE DEVICES

TL494

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (VCC = 15 V, CI = 0.01 μ F, RI = 10 k Ω unless otherwise noted.)
 For typical values TA = 25°C, for min-max values TA is the operating ambient temperature range that applies unless otherwise noted.

| Characteristic | Symbol | TL494J | | | TL494M | | | Unit |
|----------------|--------|--------|-----|-----|--------|-----|-----|------|
| | | Min | Typ | Max | Min | Typ | Max | |

OUTPUT SECTION

| | | | | | | | | |
|--|----------|---|-----|------|---|-----|------|---------|
| Collector Off-State Current (VCC = 40 V, VCE = 40 V) | IC(off) | — | 2.0 | 100 | — | 2.0 | 100 | μ A |
| Emitter Off-State Current (VCC = 40 V, VC = 40 V, VE = 0 V) | IE(off) | — | — | -100 | — | — | -150 | μ A |
| Collector-Emitter Saturation Voltage (2) Common-Emitter (VE = 0 V, IC = 200 mA) | VSAT(CE) | — | 1.1 | 1.3 | — | 1.1 | 1.5 | V |
| Emitter-Follower (VC = 15 V, IE = -200 mA) | VSAT(EF) | — | 1.5 | 2.5 | — | 1.5 | 2.5 | V |
| Output Control Pin Current Low State (VOC = 0.4 V) | IOCL | — | 10 | — | — | 10 | — | μ A |
| High State (VOC = Vref) | IOCH | — | 0.2 | 3.5 | — | 0.2 | 3.5 | mA |
| Output Voltage Rise Time Common-Emitter (See Figure 13) Emitter-Follower (See Figure 14) | tr | — | 100 | 200 | — | 100 | 200 | ns |
| Output Voltage Fall Time Common-Emitter (See Figure 13) Emitter-Follower (See Figure 14) | tf | — | 25 | 100 | — | 25 | 100 | ns |

| Characteristic | Symbol | TL494 | | | Unit |
|----------------|--------|-------|-----|-----|------|
| | | Min | Typ | Max | |

ERROR AMPLIFIER SECTIONS

| | | | | | |
|---|------|--------------------|------|---|---------|
| Input Offset Voltage (VO (Pin 3) = 2.5 V) | VIO | — | 2.0 | — | mV |
| Input Offset Current (VO (Pin 3) = 2.5 V) | IIO | — | 5.0 | — | nA |
| Input Bias Current (VC = 2.5 V) | IIB | — | -0.1 | — | μ A |
| Input Common-Mode Voltage Range (VCC = 40 V, TA = 25°C) | VICR | -0.3 to VCC-2.0 | — | — | V |
| Open-Loop Voltage Gain (SVO = 3.0 V, VO = 0.5 to 3.5 V, RL = 2.0 k Ω) | AVOL | 70 | 95 | — | dB |
| Unity-Gain Crossover Frequency (VO = 0.5 to 3.5 V, RL = 2.0 k Ω) | fC | — | 350 | — | kHz |
| Phase Margin at Unity-Gain (VO = 0.5 to 3.5 V, RL = 2.0 k Ω) | pm | — | 65 | — | deg |
| Common-Mode Rejection Ratio (VCC = 40 V) | CMRR | 65 | 90 | — | dB |
| Power Supply Rejection Ratio (SVCC = 33 V, VO = 2.5 V, RL = 2.0 k Ω) | PSRR | — | 100 | — | dB |
| Output Sink Current (VO (Pin 3) = 0.7 V) | IO- | 0.3 | 0.7 | — | mA |
| Output Source Current (VO (Pin 3) = 3.5 V) | IO+ | 2.0 | 4.0 | — | mA |

NOTE 2: Low duty cycle pulse techniques are used during test to maintain junction temperature as close to ambient temperature as possible.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับความใช้งาน และการศึกษารายละเอียด ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้
 ในทางการใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาก่อน และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งในการนำไปใช้

TL494

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (V_{CC} = 15 V, C_T = 0.01 μF, R_T = 12 kΩ unless otherwise noted.)
 For typical values T_A = 25°C, for min/max values T_A is the operating ambient temperature range that applies unless otherwise noted.

| Characteristic | Symbol | TL494 | | | Unit |
|--|------------------------|-------|------|-----|------|
| | | Min | Typ | Max | |
| PWM COMPARATOR SECTION (Test Circuit Figure 12) | | | | | |
| Input Threshold Voltage (Zero duty cycle) | V _{TH} | — | 3.5 | 4.5 | V |
| Input Sink Current (V _{Pin 3} = 0.7 V) | I ₋ | 0.3 | 0.7 | — | mA |
| DEAD-TIME CONTROL SECTION (Test Circuit Figure 12) | | | | | |
| Input Bias Current (Pin 4) (V _{Pin 4} = 0 to 5.25 V) | I _{IE} (DT) | — | -2.0 | -10 | μA |
| Maximum Duty Cycle, Each Output, Push-Pull Mode (V _{Pin 4} = 0 V, C _T = 0.01 μF, R _T = 12 kΩ) (V _{Pin 4} = 0 V, C _T = 0.001 μF, R _T = 30 kΩ) | DC-max | 45 | 45 | 50 | % |
| Input Threshold Voltage (Pin 4) (Zero Duty Cycle) (Maximum Duty Cycle) | V _{TH} | — | 2.8 | 3.3 | V |
| OSCILLATOR SECTION | | | | | |
| Frequency (C _T = 0.001 μF, R _T = 30 kΩ) | f _{osc} | — | 40 | — | kHz |
| Standard Deviation of Frequency* (C _T = 0.001 μF, R _T = 30 kΩ) | σ _{fosc} | — | 3.0 | — | % |
| Frequency Change with Voltage (V _{CC} = 2.0 V to 40 V, T _A = 25°C) | Δf _{osc} (ΔV) | — | 0.1 | — | % |
| Frequency Change with Temperature (5 T _A = T _{low} to T _{high}) (C _T = 0.01 μF, R _T = 12 kΩ) | Δf _{osc} (ΔT) | — | — | 12 | % |
| UNDERVOLTAGE LOCKOUT SECTION | | | | | |
| Turn-On Threshold (V _{CC} Increasing, I _{ref} = 1.0 mA) | V _{th} | — | 6.43 | 7.0 | V |
| TOTAL DEVICE | | | | | |
| Standby Supply Current (Pin 6 at V _{ref} , All Other Inputs and Outputs Open) (V _{CC} = 15 V) (V _{CC} = 40 V) | I _{CC} | — | 5.5 | 10 | mA |
| Average Supply Current (V _{Pin 4} = 2.0 V) (See Figure 12) (C _T = 0.01 μF, R _T = 12 kΩ, V _{CC} = 15 V) | I _{CC} | — | 7.0 | — | mA |

*Standard deviation is a measure of the statistical distribution about the mean as derived from the formula:

$$\sigma = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของ Motorola Inc. ไม่สามารถทำซ้ำหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจาก Motorola Inc. หากมีการละเมิดลิขสิทธิ์ใดๆ ทาง Motorola Inc. ขอสงวนสิทธิ์ในข้อนี้

FIGURE 4 — OSCILLATOR FREQUENCY versus TIMING RESISTANCE

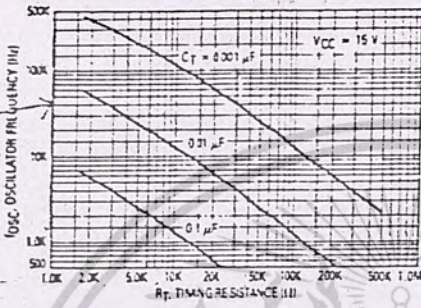


FIGURE 5 — OPEN-LOOP VOLTAGE GAIN AND PHASE versus FREQUENCY

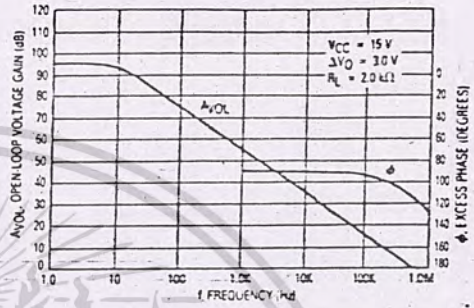


FIGURE 6 — PERCENT DEAD-TIME versus OSCILLATOR FREQUENCY

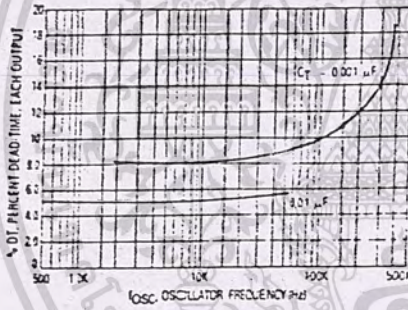


FIGURE 7 — PERCENT DUTY CYCLE versus DEAD-TIME CONTROL VOLTAGE

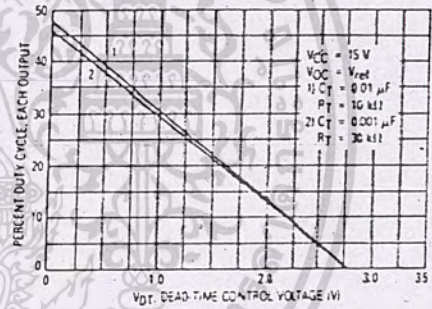


FIGURE 8 — EMITTER FOLLOWER CONFIGURATION OUTPUT SATURATION VOLTAGE versus EMITTER CURRENT

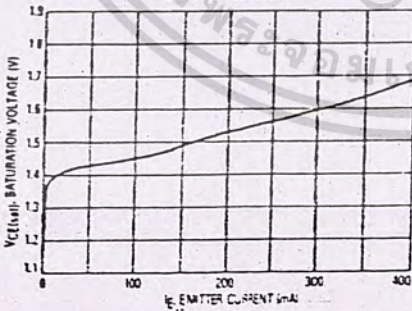
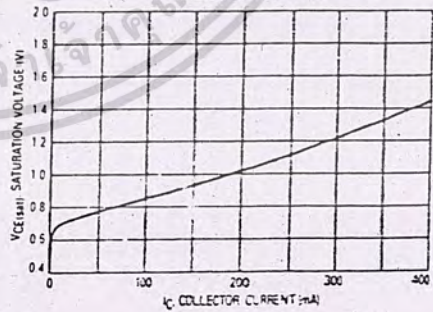


FIGURE 9 — COMMON EMITTER CONFIGURATION OUTPUT SATURATION VOLTAGE versus COLLECTOR CURRENT



ขอสงวนสิทธิ์ในข้อมูลทางเทคนิคนี้... ข้อมูลนี้จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการคำนวณและออกแบบวงจร... กรุณาตรวจสอบข้อมูลล่าสุดจากเอกสารข้อมูลผลิตภัณฑ์ของเรา...

FIGURE 10 — STANDBY SUPPLY CURRENT versus SUPPLY VOLTAGE

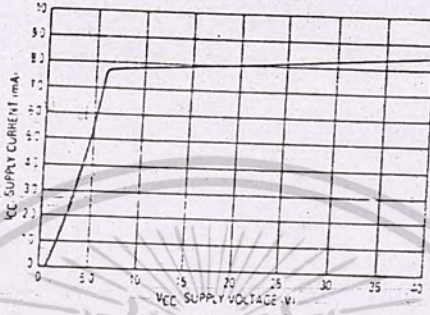


FIGURE 11 — ERROR AMPLIFIER CHARACTERISTICS

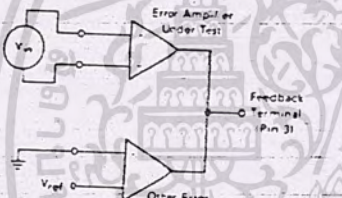


FIGURE 12 — DEAD-TIME AND FEEDBACK CONTROL TEST CIRCUIT

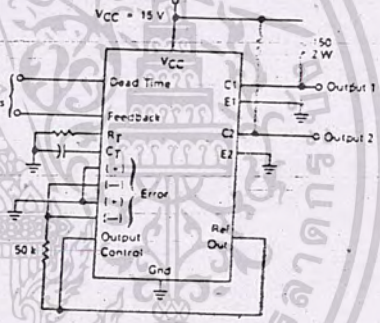


FIGURE 13 — COMMON-EMITTER CONFIGURATION TEST CIRCUIT AND WAVEFORM

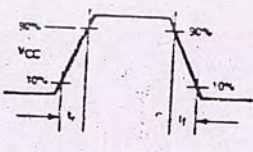
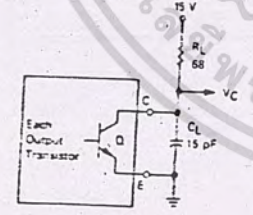
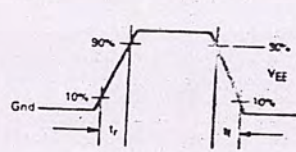
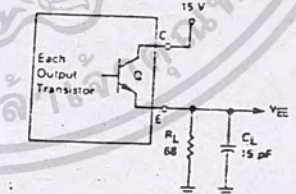


FIGURE 14 — EMITTER-FOLLOWER CONFIGURATION TEST CIRCUIT AND WAVEFORM



ขอสงวนสิทธิ์ในเอกสารนี้สำหรับใช้ในงานศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำมาใช้เพื่อการค้า
 ในวารสารใด ๆ ที่สนใจอื่น ๆ ที่มีการแก้ไขเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494

FIGURE 18 — SLAVING TWO OR MORE CONTROL CIRCUITS

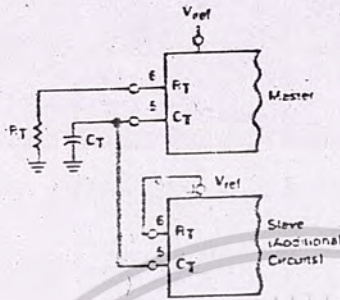


FIGURE 20 — OPERATION WITH $V_{in} > 40V$ USING EXTERNAL ZENER

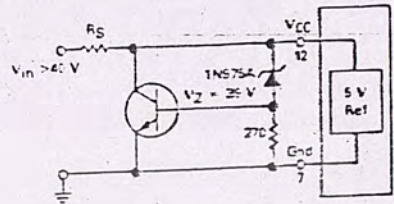
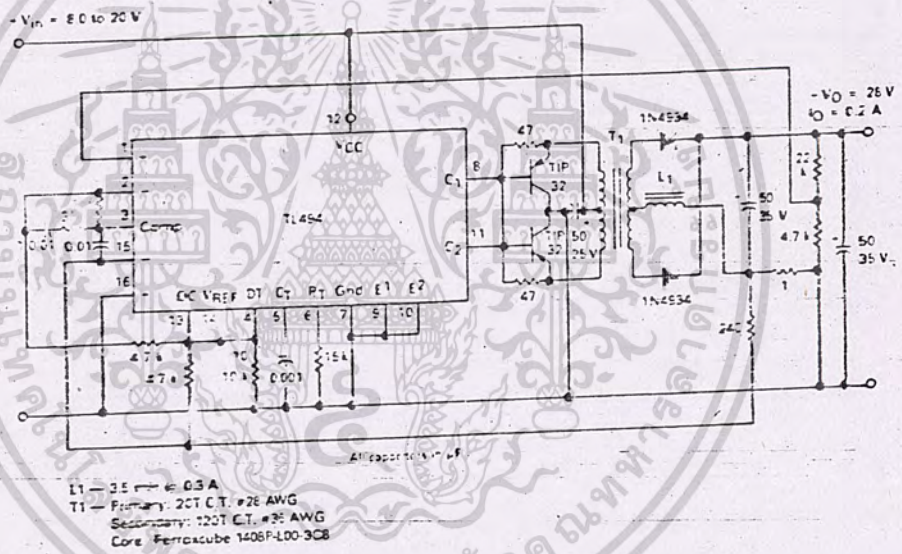


FIGURE 21 — PULSE-WIDTH MODULATED PUSH-PULL CONVERTER



| TEST | CONDITIONS | RESULTS |
|-----------------------|-----------------------------------|--------------------|
| Line Regulation | $V_{in} = 10V$ to $40V$ | 14 mV 0.26% |
| Load Regulation | $V_{in} = 28V, I_O = 1mA$ to $1A$ | 30 mV 0.06% |
| Output Ripple | $V_{in} = 28V, I_O = 1.0A$ | 65 mV P-P F.A.R.D. |
| Short Circuit Current | $V_{in} = 28V, R_L = 0.1\Omega$ | 1.6 amps |
| Efficiency | $V_{in} = 28V, I_O = 1A$ | 71% |

MOTOROLA

INTERFACE DEVICES

TL494

FIGURE 15 — ERROR AMPLIFIER SENSING TECHNIQUES

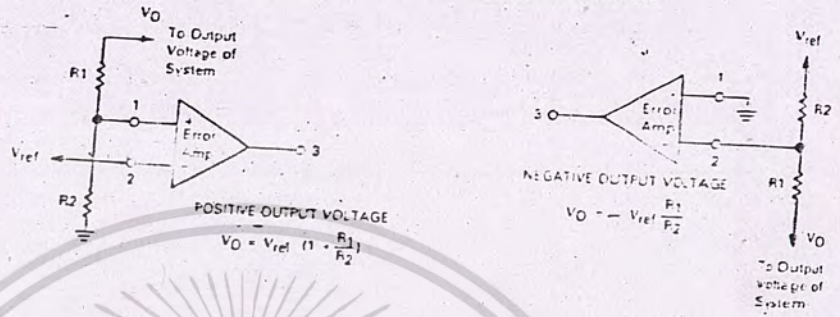


FIGURE 16 — DEAD TIME CONTROL CIRCUIT

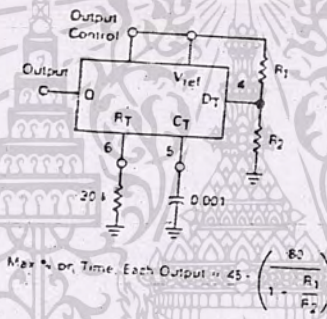


FIGURE 17 — SOFT START CIRCUIT

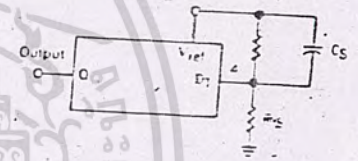
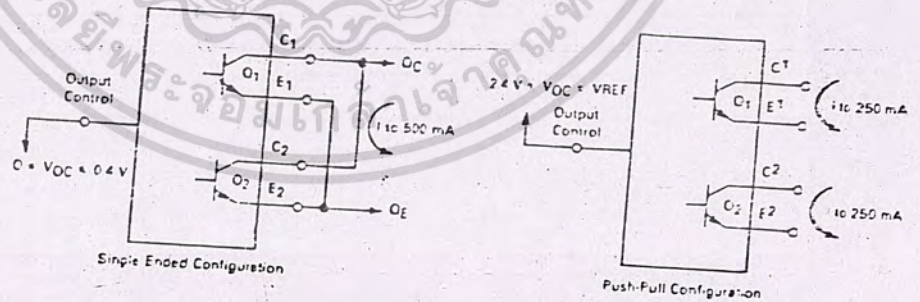


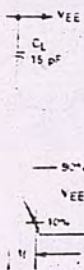
FIGURE 18 — OUTPUT CONNECTIONS FOR SINGLE-ENDED AND PUSH-PULL CONFIGURATIONS



BACK CONTROL



R CONFIGURATION WAVEFORM



แบตเตอรี่

แบตเตอรี่ เป็นแหล่งสะสมพลังงานทางไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ซึ่งจะจ่ายพลังงานออกมา
จากรูปไฟฟ้ากระแสตรง แบตเตอรี่ในความหมายทางไฟฟ้าจะต้องประกอบด้วยเซลล์ที่นำมาต่อ
อนุกรมกัน

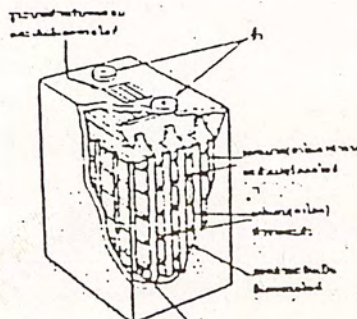
เซลล์ของแบตเตอรี่แบ่งได้เป็น

1. เซลล์ปฐมภูมิ (PRIMARY CELL) เซลล์ชนิดนี้เมื่อสร้างเสร็จก็สามารถนำ
ไปใช้เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ทันที และเมื่อนำไปใช้แล้วพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายออกมาก็จะหมด
ไป จะไม่สามารถนำเซลล์ชนิดนี้ออกมาใช้ได้อีก

2. เซลล์ทุติยภูมิ (SECONDARY CELL) เซลล์ชนิดนี้เมื่อสร้างขึ้นมาแล้วจะต้อง
นำไปทำการประจุไฟหรือชาร์จไฟเสียก่อน จึงจะจ่ายกระแสไฟออกมาได้ และเมื่อใช้
กระแสไฟฟ้าไป (DISCHARGE) จนกระทั่งกระแสอ่อนลง ก็สามารถนำไปประจุไฟใหม่
เพื่อนำไปใช้ซ้ำอีกได้

จากคุณสมบัติของเซลล์ทุติยภูมิที่กล่าวมา เมื่อเซลล์ถูกใช้งานไฟหมดแล้วสามารถจะ
นำไปประจุไฟใหม่เพื่อจะได้ใช้ต่อไป ด้วยคุณสมบัติอันนี้ เราจึงนำเซลล์ของแบตเตอรี่ชนิด
ทุติยภูมิมาใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงให้กับวงจรภาค INVERTER ได้

เซลล์ทุติยภูมิที่จะใช้เป็นเซลล์แบบตะกั่ว-กรด (LEAD-ACID) ซึ่งใช้ทั่วไปใน
รถยนต์ ดังแสดงในรูป 3.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างของเซลล์แบบตะกั่ว-กรด

เซลล์แบบตะกั่ว-กรด จะประกอบไปด้วยแผ่นคาโธดและแผ่นแอโนดวางสลับกัน โดยจะจุ่มอยู่ในสารอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งทำมาจากสารละลายกรดกำมะถัน แผ่นเพลทจะวางสลับกันเพื่อจะได้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับสารอิเล็กโทรไลต์ได้มาก โดยที่มีปริมาตรน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ และการที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด และ สารอิเล็กโทรไลต์มากเท่าไร ปฏิกิริยาเคมีที่จะเกิดก็มากขึ้นเท่านั้น นอกจากนี้ค่าความต้านทานภายในเซลล์ก็จะมีค่าน้อยลงด้วย ดังนั้นเราจึงใช้แบบที่เป็นแผ่นบาง ๆ และคั่นด้วยฉนวนแบบมีรูพรุน

อิเล็กโทรดที่เป็นแอโนด จะสร้างขึ้นมาจากตะกั่วบริสุทธิ์ และคาโธดจะสร้างจากส่วนผสมของตะกั่วและตะกั่วเปอร์ออกไซด์ ในขณะที่เซลล์คายประจุให้กระแสไฟฟ้าออกมา อะตอมของตะกั่วจากแผ่นแอโนดจะแตกตัวเป็นอิออนที่มีประจุบวกเข้าไปรวมอยู่ในสารอิเล็กโทรไลต์ และปล่อยอิเล็กตรอนให้ไหลผ่านวงจรที่นำมาต่อจากภายนอก ดังแสดงในรูปที่

3.2

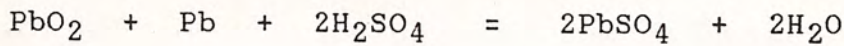


รูปที่ 3.2

ที่คาโธด ตะกั่วเปอร์ออกไซด์จะแตกตัวเป็นอิออนของตะกั่ว ซึ่งจะมีทั้ง อิออนประจุบวกและอิออนประจุลบ อิออนที่มีประจุบวกจะดึงเอาอิเล็กตรอนจากวงจรจากภายนอกมารวมตัวกลายเป็นอิออนของตะกั่วที่มีประจุบวก ซึ่งเป็นชนิดเดียวกับที่แอโนด ทำให้เกิดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้ากระแสไฟหลังจากคาโธดผ่านไปยังวงจรภายนอกไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ อิออนของตะกั่วจากแผ่นอิเล็กโทรดทั้งสอง จะทำปฏิกิริยากับกรดกำมะถันซึ่งเป็น

อิเล็กโตรไลต์ กลายเป็นตะกั่วซัลเฟตและกาซไฮโดรเจน (ซึ่งจะรวมกับอ็อกซิเจนของออก-
ซิเจนจากคาร์บอกไซด์กลายเป็นน้ำ)

เราสามารถเขียนสูตรของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นได้ดังนี้



ซึ่งแสดงว่าปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ ดังนั้นจึงสามารถที่จะประจุ เซลล์
ใหม่ได้ โดยการต่อวงจร ซึ่งจะจับอิเล็กตรอนให้ไหลจากคาร์บอกไซด์ไปสู่แอโนด

สูตรทางเคมีแสดงให้เห็นว่าสารละลายอิเล็กโตรไลต์จะเจือจางลง โดยโมเลกุล
ของน้ำที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นขณะเดียวกับที่เซลล์คายประจุ หากให้เราสามารถใช้เป็นวิธีสถานะ
การประจุและการคายประจุของเซลล์ได้ โดยวัดความต่างศักย์ของอิเล็กโตรไลต์ ซึ่ง
จะบอกว่าเซลล์จะถึงสถานะที่คายประจุจนหมดหรือยัง เพื่อที่จะได้ทำการประจุไฟเข้าไป
ใหม่ โดยค่าความต่างศักย์ของเซลล์ที่มีประจุเต็มที่จะมีค่าประมาณ 1.25 และค่าความ
ต่างศักย์ของเซลล์ที่คายประจุจนหมดจะมีค่าประมาณ 1.2 โดยเราจะใช้ไฮโดรมิเตอร์
ในการวัดแรงดันของเซลล์ซึ่งโดยปกติมีค่าเท่ากับ 2 โวลต์

การประจุเซลล์แบบตะกั่ว-กรด โดยการป้อนกระแสกลับทางเข้าไปในแบตเตอรี่
เพื่อบังคับให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น โดยจะเกิดจากทางขั้วลบไปทางขั้วบวก ซึ่งจะเปลี่ยน
ตะกั่วซัลเฟตให้กลับเป็นตะกั่วและกรดกำมะถันตามเดิม วิธีการป้อนกระแสกลับทางทำได้โดย
การต่อคาร์บอกไซด์และแอโนดเข้ากับขั้วบวกและขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟภายนอก ซึ่งจะมีแรงดัน
ของแหล่งจ่ายไฟภายนอกอยู่ในช่วง 1.1-1.25 ของแรงดันเซลล์ปกติ

กระแสที่ป้อนเข้าไปเมื่อประจุไฟหมดนั้นจะขึ้นอยู่กับแรงดันที่ป้อนเข้าไป นอกจากนี้
ยังขึ้นอยู่กับสถานะของเซลล์อีกด้วยว่าคายประจุหรือยัง ถ้าแรงดันที่ป้อนเข้าประจุไฟมีค่าสูง
และเซลล์คายประจุหมดเต็มที่แล้ว ก็จะทำให้กระแสที่ไหลเข้าประจุเซลล์มีค่ามากตามไปด้วย
หรือถ้าเซลล์ถูกใช้แบบเป็นวงจร คือจากสถานะประจุเต็มไปสู่สถานะหมดประจุเต็มที่แล้ว
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
จึงค่อยประจุใหม่อีกครั้งหนึ่ง จำนวนการประจุจะใช้กระแสมาวัด แต่ถ้าเซลล์ถูกใช้งานพร้อมๆกับ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้
ประจุไฟเข้าตลอดเวลา กระแสที่ใช้ในการประจุจะมีค่าต่ำ

วงจรที่ใช้งานการประจุแบตเตอรี่แบบตะกั่ว-กรดจะแสดงดังรูป 3.3ก



รูปที่ 3.3ก

รูปที่ 3.3ข

ซึ่งแสดงให้เห็นแหล่งจ่ายไฟที่มีแรงดันคงที่ต่ออยู่กับแบตเตอรี่ วงจรสมมูลย์ของรูป 3.3ก จะแสดงให้เห็นในรูป 3.3ข ซึ่งเราจะเห็นว่า แบตเตอรี่จะเปรียบเสมือนว่าประกอบด้วยตัวต้านทาน 2 ตัว โดย R_1 เป็นความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ ไม่ว่าจะกำลังประจุหรือคายประจุอยู่ ส่วนตัวต้านทาน R_2 จะมีค่าเปลี่ยนแปลงโดยจะขึ้นอยู่กับสถานะการหมดประจุของแบตเตอรี่ เมื่อแบตเตอรี่คายประจุหมดเต็มที่ ค่าความต้านทานตัวนี้จะมีค่าต่ำ ดังนั้นกระแสในการประจุจึงมีค่าสูง อย่างไรก็ตามเมื่อแบตเตอรี่ใกล้ประจุเต็มที่แล้ว ค่าความต้านทาน R_2 จะมีค่าสูงขึ้นทำให้กระแสที่ใช้งานการประจุลดลง เราสามารถตรวจสอบสถานะของแบตเตอรี่ได้ โดยสังเกตค่าของกระแสที่ใช้งานการประจุ ซึ่งจะช้าได้ก็ต่อเมื่อแรงดันที่ใช้งานการประจุมีค่าคงที่

ในส่วนของวงจรอัดประจุแบตเตอรี่จึงเป็นส่วนที่จำเป็นมากสำหรับ UPS เพราะ LOAD จะใช้กระแสจากแบตเตอรี่ตลอดเวลา นั้นย่อมทำให้โวลเตจของแบตเตอรี่ลดลง เมื่อโวลเตจใช้กระแสมากหรือเป็นเวลานาน เราจึงต้องใช้งานการอัดประจุแบตเตอรี่ เพื่อที่จะให้ได้โวลเตจเต็มอีกครั้งหนึ่ง อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการ

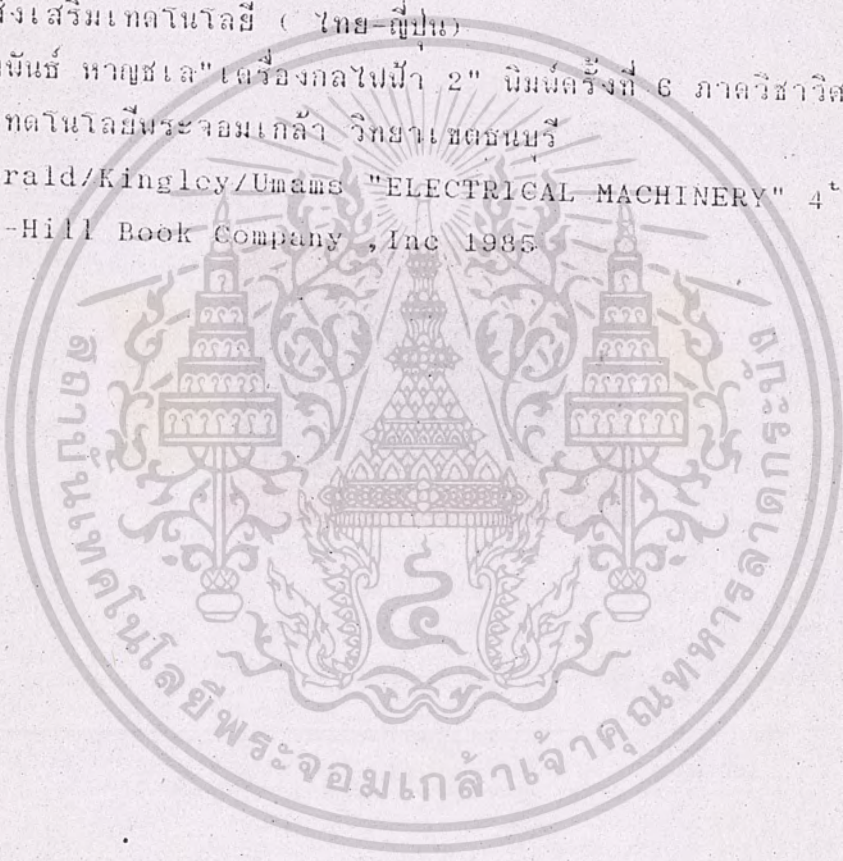
งานเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่โดยทั่วไปจะมีหลักการใหญ่ ๆ อยู่ 3 ประการคือ ๑. ซึ่งอัดด้วยแรงดันคงที่ กระแสคงที่ หรืออัดเป็นจังหวะ หรืออาจจะใช้หลายอย่างผสมกันก็ได้ จากวงจรที่เราออกแบบนี้จะใช้วิธีการอัดประจุให้แบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ โดยจะแบ่งช่วงการอัดประจุนอกเป็น 3 ช่วง

งานช่วงแรกของการอัดประจุจะเป็นช่วงซึ่งแบตเตอรี่ถูกใช้งานจนหมดเกลี้ยง จะถูกกำหนดให้อัดประจุด้วยกระแสค่อนข้างน้อย คือมีค่าประมาณ 5% ของค่าแอมแปร์-ชม (Ampere-Hour เป็นค่าความจุสการงานของแบตเตอรี่ว่ามากน้อยเพียงใด) เท่านั้น เพราะว่าเวลาที่เครื่องอัดแบตเตอรี่ยังจ่ายกระแสมากในขณะที่แบตเตอรี่มีแรงดันน้อย กำลังที่สูญเสียไปในทรานซิสเตอร์ในเครื่องอัดแบตเตอรี่จะยิ่งสูงมาก จึงเป็นการเพิ่มขนาดทนกำลังของทรานซิสเตอร์โดยไม่จำเป็น แรงดันของแบตเตอรี่ในช่วงนี้ จะถูกกำหนดไว้ตั้งแต่ 0-10 โวลต์ และงานทันทีที่แรงดันของแบตเตอรี่มีค่าเพิ่มขึ้นถึง 10 โวลต์ การอัดประจุก็จะเข้าสู่ในช่วงที่สองทันที ซึ่งในช่วงที่สองของการอัดประจุนี้ จะมีการเพิ่มอัตราการอัดขึ้นทันทีด้วยกระแสที่มีค่าเป็น 20% ของค่าแอมแปร์-ชั่วโมง เมื่อแรงดันของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นไปอีกจนถึง 14.4 โวลต์ (หรือใกล้เคียง) กระแสที่อัดอยู่จะตกลงไปทันที เนื่องจากถือว่าแบตเตอรี่มีค่าเต็มที่แล้ว จึงนับเป็นช่วงที่สามของการอัดประจุ แต่ในช่วงที่สามนี้ก็ยังไม่เลิกอัดประจุเสียทีเดียว เพียงแต่จะอัดค่าน้อย ๆ เท่านั้น และจะค่อย ๆ ลดลงจนกระทั่งเป็นศูนย์เมื่อแรงดันของแบตเตอรี่ขึ้นถึงประมาณ 16.5 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

1. ยืน กุ้ววรรณ " ทฤษฎี และการใช้งาน อิเล็กทรอนิกส์ เล่ม 1", ซึ่งเอ็ดยูเคชั่น
2. วิชัย สังข์ขัตติยานนท์ " ควบคุมเครื่องกลไฟฟ้า ด้วยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง 2 " สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)
3. รศ. สัมพันธ์ หาญชล " เครื่องกลไฟฟ้า 2 " นิตยสารที่ 6 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตธนบุรี
4. Fitzgerald/Kinglcy/Umams "ELECTRICAL MACHINERY" 4th Edition McGraw-Hill Book Company ,Inc 1985



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้