

การขับเคลื่อนมอเตอร์ขนาด 800 W, 220V ที่ 2500 rpm ด้วยแบตเตอรี่ตะกั่วกรด

บทนำ

ประเทศไทยและประเทศที่กำลังพัฒนาทั้งหลาย มีพื้นที่ชนบทห่างไกลความเจริญที่ไฟฟ้ายังเข้าไม่ถึงอยู่เป็นจำนวนมาก พื้นที่เหล่านั้นมักเป็นถิ่นกันดาร มีสภาพอากาศร้อนชื้น เต็มไปด้วยฝุ่นละออง การพัฒนาทางเกษตรกรรม กสิกรรม การสาธารณสุขในพื้นที่เหล่านั้นและอาจรวมถึงการพัฒนาให้เป็นแหล่งท่องเที่ยว มีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องใช้ไฟฟ้าเพื่อป้อนเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ให้ใช้งานได้ ตัวอย่างเช่น ปั๊มน้ำมอเตอร์ของเครื่องสีข้าว ไฟฟ้าแสงสว่าง และเครื่องมือสื่อสาร เป็นต้น แหล่งพลังงานทางเลือกอาจมาจากแสงอาทิตย์ พลังน้ำมวลชีวภาพหรือแบตเตอรี่ เป็นอาทิ แต่การใช้แหล่งพลังงานทางเลือกมักหลีกเลี่ยงไม่พื้นที่ที่ต้องใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานสำรอง หรือแม้แต่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานหลัก ดังนั้น เทคโนโลยีที่เหมาะสมต่อการใช้งานแบตเตอรี่ในถิ่นกันดารจึงเป็นสิ่งจำเป็น

บทความนี้ นำเสนอรายละเอียดการพัฒนาเทคโนโลยีที่เหมาะสม เพื่อใช้งานในชนบทห่างไกลเมื่อต้องการพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ไปจ่ายอุปกรณ์ไฟฟ้า

ต่างๆ อุปกรณ์ที่เป็นภาระของแบตเตอรี่ในงานวิจัยพัฒนานี้ เป็นมอเตอร์กระแสตรงพิกัด 800 W เดินที่อัตราเร็ว 2500 รอบต่อนาที (rpm) ต่อควบบั้ม้หอยโข่งเพื่อให้สูบน้ำด้วยอัตราคงที่ตลอดเวลาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ที่ต้องใช้งานร่วมกับแบตเตอรี่ มุ่งเน้นไปที่การหาได้ง่ายภายในประเทศ มีความทนทาน บำรุงรักษาง่ายและราคาถูก โครงสร้างของระบบได้รับการอธิบายในหัวข้อถัดไป และองค์ประกอบต่างๆ ในระบบรวมถึงผลการทดสอบ ได้รับการกล่าวถึงตามลำดับในบทความนี้

โครงสร้างของระบบ

ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงชนิดวงจรสวมแยกส่วนใช้พลังงานขับเคลื่อนจากแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด (lead acid) โดยแปลงผันพลังงานจากแบตเตอรี่ที่มีขนาดแรงดัน 48 Vdc เป็น 220 Vdc มีส่วนประกอบที่สำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 1 ประกอบด้วยชุดแบตเตอรี่ขนาด 48 Vdc อุปกรณ์จำกัดกระแส (current regulator) อุปกรณ์คอนเวอร์เตอร์ (converter) ตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ (drive amplifier) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เช่น เซอร์โวความเร็ว (speed sensor) และตัวควบคุม (controller)

อุปกรณ์คอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนแรงดัน จะเปลี่ยนแรงดันของแบตเตอรี่ 48 Vdc ให้เป็น 220 Vdc เพื่อจ่ายให้มอเตอร์ โดยจ่ายผ่านวงจรสับไฟฟ้ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ตัวควบคุมจะทำหน้าที่สร้างสัญญาณบังคับตัวขับ เพื่อให้มอเตอร์ตอบสนองตามสัญญาณอ้างอิง โดยเซนเซอร์วัดความเร็วจะทำหน้าที่ส่งสัญญาณที่วัดได้จากความเร็วเป็นเอาต์พุตของมอเตอร์มายังตัวควบคุม เพื่อรักษาความเร็วให้คงที่ที่ 2500 rpm ซึ่งมอเตอร์จะกินกระแสสูงถึง 4.5 A

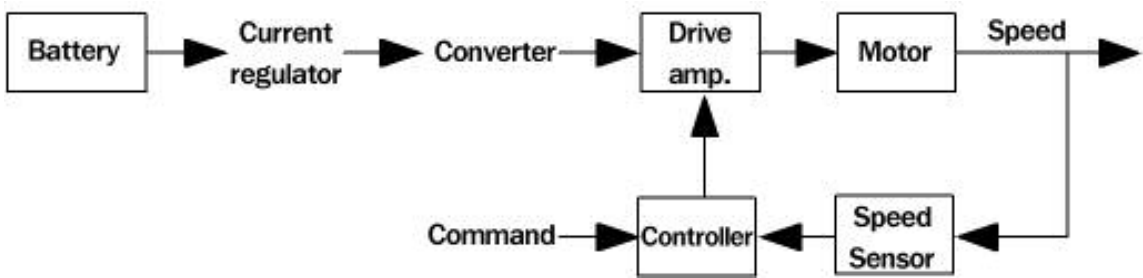
ลักษณะสมบัติของแบตเตอรี่

แบตเตอรี่ที่มีใช้โดยทั่วไป เป็นแบบตะกั่วกรด ภายในประกอบด้วยแผ่นธาตุทำมาจากผงตะกั่วบริสุทธิ์อัดแน่นในแผ่นตะแกรงตะกั่ว แยกออกเป็นหลายๆ ช่องเรียกว่า เซลล์ แต่ละเซลล์มีขนาดแรงดัน 2 Vdc การเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่โดยการประจุไฟตามกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (Nelson, and Bolin, 1995). เมื่อนำแบตเตอรี่มาจ่ายพลังงานให้แก่ภาระ ปฏิกริยาเคมีจะค่อยๆ เกิดย้อนกลับจนแบตเตอรี่ไม่สามารถจ่ายพลังงานได้และเกิดความร้อนขึ้นที่ตัวถังแบตเตอรี่เอง เมื่อทำการทดสอบแบตเตอรี่ขนาด 12 Vdc ความจุ 65 Ah โดยมีการประจุพลังงานให้มีระดับแรงดันที่ 12.4 Vdc (หมายเหตุ ในทางปฏิบัติสามารถอัดประจุจนแบตเตอรี่มีแรงดัน 13.8-14.0 Vdc ได้)

ขั้วภาระที่มีขนาด 4A ทำการทดสอบเป็นเวลา 250 นาที ระดับแรงดันมีการเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 2 จะสามารถเห็นได้ว่า แรงดันแบตเตอรี่ลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงระดับ 11.8 Vdc แรงดันจะตกลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงควรยุติการจ่ายพลังงาน เพื่อป้องกันสภาวะเกิดแก๊สและการเสียหายอย่างถาวรในแบตเตอรี่ (Salameh, Casacca, and Lynchi, 1992) เมื่อใช้วิธีการถดถอยเชิงเส้นกับผลการทดสอบ พบว่า มีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง $V_b = - 0.0025t + 12.4$ V. ซึ่ง V_b คือแรงดันของแบตเตอรี่ และเมื่อนำแบตเตอรี่หลายลูกมาใช้งานร่วมกัน มีความจำเป็นที่จะต้องกำกับให้แบตเตอรี่แต่ละลูกคายประจุในระดับเท่าเทียมกัน เพื่อให้แบตเตอรี่มีอายุใช้งานยาวนาน ดังนั้น อุปกรณ์จำกัดกระแสของแบตเตอรี่จึงเป็นสิ่งจำเป็น

อุปกรณ์จำกัดกระแส

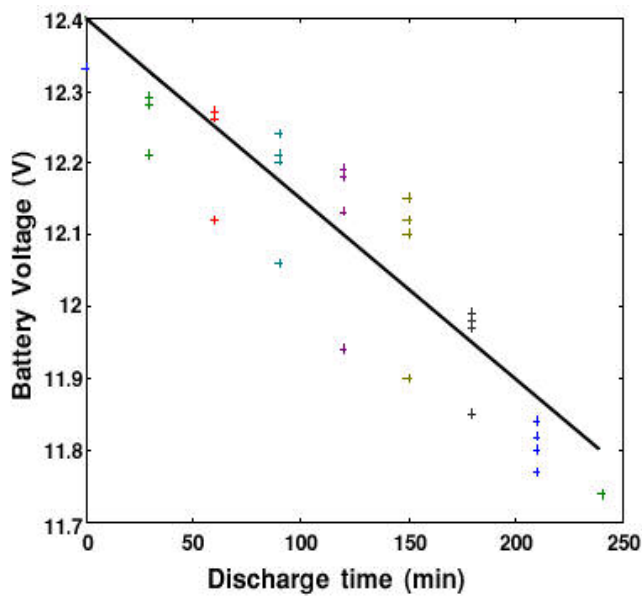
แบตเตอรี่แต่ละลูกมีลักษณะสมบัติที่มีได้เหมือนกันทุกประการ และยังไม่เป็นเชิงเส้นอีกด้วยเมื่อนำแบตเตอรี่มาต่อร่วมกัน ลูกที่มีพลังงานมากกว่าจะถ่ายเทพลังงานให้แก่ลูกที่ต่ำกว่า จึงเสมือนว่า แบตเตอรี่พยายามจะปรับการจ่ายพลังงานให้มีระดับที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อตัวแบตเตอรี่ ในกรณีเช่นนี้จึงจำเป็นต้องใช้การจำกัดกระแส (current regulator) จึงมีบทบาทที่สำคัญต่อการรักษาสภาพการ



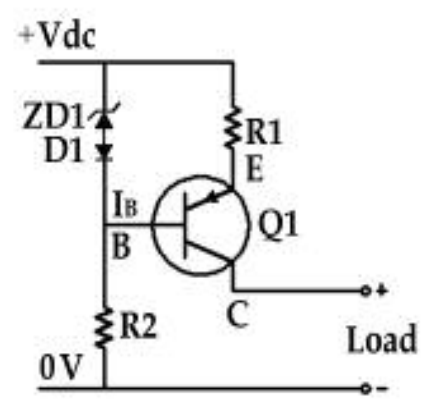
รูปที่ 1 แผนภาพบล็อกระบบควบคุมมอเตอร์ที่มีแหล่งจ่ายพลังงานเป็นแบตเตอรี่

ใช้งานของแบตเตอรี่ ด้วยการกำกับให้แบตเตอรี่แต่ละลูกจ่ายกระแสเท่าๆ กัน รูปที่ 3 แสดงการนำแบตเตอรี่ต่อกับภาระโดยผ่านวงจรจำกัดกระแส ซึ่งจะควบคุมไม่ให้แบตเตอรี่ชุดใดชุดหนึ่งจ่ายพลังงานมากเกินไปที่กำหนดวงจรจำกัดกระแสมีรูปลักษณะ ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4 การที่จะให้วงจรดังกล่าว รับกระแสได้สูงมากขนาดไหน ก็ขึ้นอยู่กับทางเลือกอัตราพิกัตของทรานซิสเตอร์และอุปกรณ์ประกอบอย่างเหมาะสม ในวงจรรูปที่ 4 มีไดโอด D1 ต่ออยู่กับขาเบสของทรานซิสเตอร์ เพื่อทำหน้าที่ขดเซย์อุณหภูมิ เพื่อให้ V_{BE} ของทรานซิสเตอร์ Q1 คงที่ แรงดันที่ตกคร่อม R1 จะถูกกำหนดโดยแรงดันของซีเนอร์ไดโอด (ZD1) และแรงดันที่ตกคร่อม R2 ช่วยในการไบอัสแก่ซีเนอร์ไดโอด

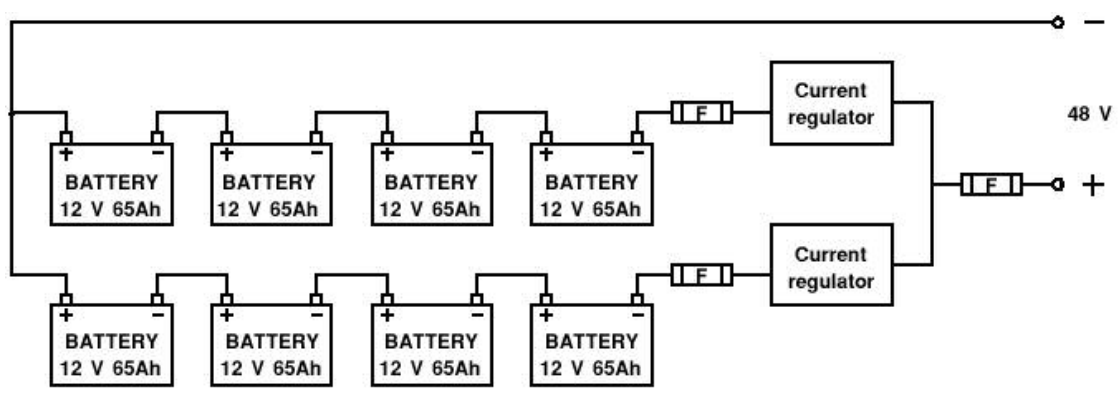
(ZD1) ปัญหาที่อาจพบได้ประการหนึ่งคือ อุณหภูมิของ ZD1 ขณะทำงานส่งผลกระทบต่อกระแสไบอัส I_B ของ Q1 กล่าวคือ หาก ZD1 มีอุณหภูมิสูงจะทำให้ I_B มีขนาดลดลง เป็นผลให้ Q1 ไม่นำกระแสแก้ไขได้โดยเลือกใช้ทรานซิสเตอร์ที่มีค่า h_{fe} สูงๆ เพราะเมื่อทรานซิสเตอร์มีค่า h_{fe} สูง จะทำให้กระแสเบสลดลงเมื่อเทียบกับกระแสไบอัสของซีเนอร์ไดโอด พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแบตเตอรี่เป็นชนิดกระแสตรงที่มีแรงดันเฉลี่ย 48 Vdc เมื่อต้องจ่าย 220 Vdc แก่มอเตอร์ การเพิ่มขนาดแรงดันที่เหมาะสมต่อการใช้งานในภูมิภาคอากาศร้อนขึ้นและกันดารจึงควรใช้เทคโนโลยีที่มีความทนทานในแบบของอินเวอร์เตอร์และหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งได้บรรยายไว้ในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 2 แสดงระดับแรงดันแบตเตอรี่ในการทดสอบขับภาระเทียบกับเวลา



รูปที่ 4 วงจรคุมค่ากระแส

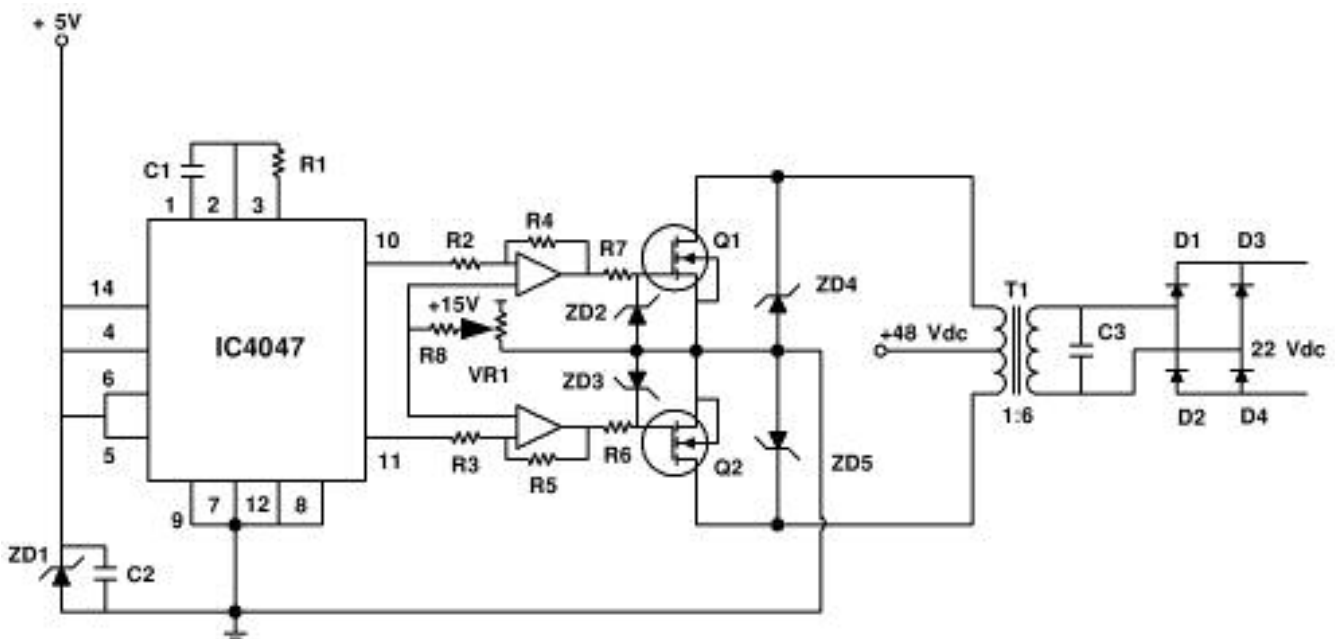


รูปที่ 3 แสดงตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์จำกัดกระแสของแบตเตอรี่

อุปกรณ์คอนเวอร์เตอร์

พิจารณารูปที่ 5 เมื่อจ่ายแรงดันให้กับวงจร IC4047 ซึ่งมีลักษณะการต่อเป็นวงจรอะอสซิลเลตอร์เวเบอร์เตอร์ จึงเริ่มทำงาน เพราะขา 14 ได้รับแรงดันไปเลี้ยง เป็นผลให้ IC4047 เริ่มผลิตความถี่ค่า 50 Hz ออกมาทางขา 10 (ขา Q) กับขา 11 (ขา \bar{Q}) ซึ่งเป็นขาเอาต์พุตของ IC4047 สัญญาณที่ขาทั้งสองจะมีสถานะตรงกันข้ามเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 6 ค่าความถี่ที่ผลิตออกมาสามารถทำการปรับได้โดยเปลี่ยนค่า R1 และ C1 เอาต์พุตที่ออกจากขา IC4047 จะป้อนให้ฮอปแอมป์ ซึ่งต่อวงจรเป็นแบบขยายสัญญาณให้มีระดับที่สูงขึ้น จากนั้นจึงส่งต่อไปที่ขาเกทของ มอสเฟต IRFP460LC Q1 และ Q2 ที่ทำหน้าที่เป็นสวิทช์ ความเร็วสูงขยายกำลังขึ้นครั้งสุดท้าย ก่อนส่งไปที่หม้อแปลง T1 มีอัตราส่วนการแปลง 1:6 หม้อแปลงที่ใช้ควรเป็นแบบทอรอยด์ที่มีการสูญเสียต่ำ สำหรับ ZD4 และ ZD5 ทำหน้าที่ป้องกันแรงดันย้อนกลับหม้อแปลง ซึ่งแรงดันนี้จะมีค่าสูงชั่วขณะอาจทำให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์

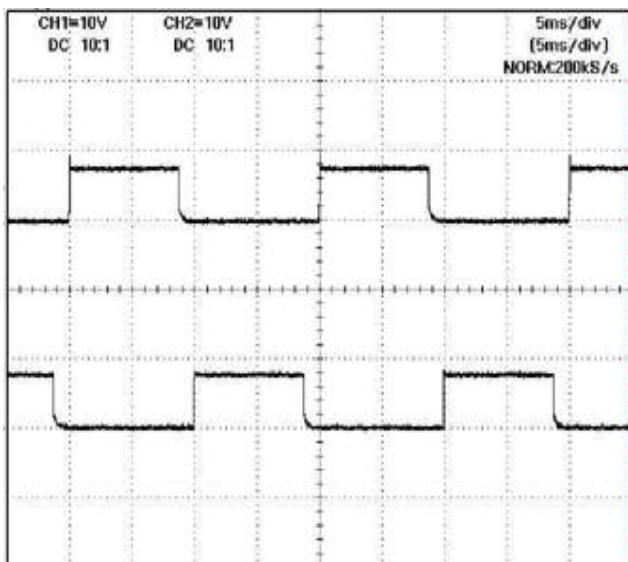
ต่างๆ ได้ หม้อแปลง T1 ที่ใช้จะเป็นแบบเซ็นเตอร์แทป เพราะแรงดันที่ป้อนจะมีสองชุด T1 จะทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟสลับ 48 Vdc ที่มีวงรอบการทำงาน (duty cycle) 50% ที่ได้จาก Q1 และ Q2 ไปเป็น 220 Vac ซึ่งแรงดันขนาดนี้สามารถเข้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสสลับโดยทั่วไปได้ C3 จะทำหน้าที่กรองสัญญาณความถี่สูงที่ออกมาจากหม้อแปลง ไม่ให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ที่ต่อทางด้านเอาต์พุต แรงดันกระแสสลับที่ออกจากหม้อแปลง จะถูกแปลงเป็นแรงดันไฟตรงด้วยเรกติฟายเออร์แบบบริดจ์เต็มคลื่น (D1 ถึง D4) ไดโอดที่ใช้จะต้องทนแรงดันและกระแสได้สูงๆ ซึ่งให้เอาต์พุตดังที่แสดงในรูปที่ 7 อย่างไรก็ตาม พิกัดการจ่ายกำลังสูงสุดนั้นขึ้นอยู่กับหม้อแปลง T1 สำหรับ Q1 และ Q2 จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องระบายความร้อนอย่างดี ซึ่งในพื้นที่กันดารที่กล่าวถึงควรระบายความร้อนด้วยแผ่นระบายความร้อนขนาดใหญ่และอาจต้องใช้พัดลมความเร็วรอบสูงหลายตัวช่วยเป่าระบายความร้อนด้วย



รูปที่ 5 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์

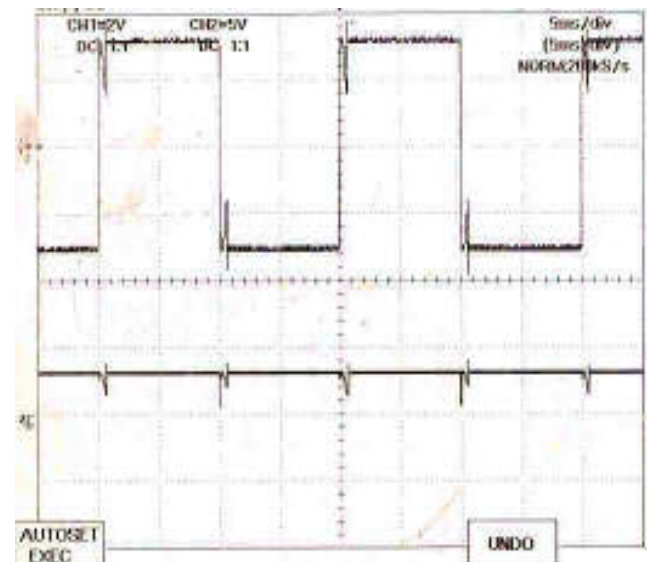
วงจรสับไฟฟ้า

เนื่องจากแรงดันจากแบตเตอรี่ลดลงตลอดเวลา จึงจำเป็นต้องหาหนทางรักษาระดับแรงดัน 220 Vdc ที่จะป้อนแก่มอเตอร์ให้คงค่าไว้ได้ นอกจากนั้นวงจรที่ไปประโยชน์ควรที่จะสามารถเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์อย่างนุ่มนวลได้ ให้การป้องกันการกระชากกระแสของมอเตอร์เป็นการยืดอายุการใช้งานแบตเตอรี่ให้ยาวนาน วงจรสับไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่ทำให้การทำงานตามต้องการสามารถรักษาระดับแรงดันได้โดยอาศัยหลักการสับแรงดันไฟฟ้าออกเป็นช่วงสลับที่มีระยะเวลา t_{ON} และ t_{OFF} เมื่อต้องการเพิ่มระดับแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์สูงขึ้น ระยะเวลา t_{ON} จะกว้างจนถึงระดับแรงดันอ้างอิง ในรูปที่ 8 (ก) แสดงการใช้วงจรสับไฟฟ้า เพื่อปรับเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงปรับค่าได้ และในรูปที่ 8 (ข) แสดงรูปคลื่นการสับแรงดันออกเป็นช่วงสลับ วงจรสับไฟฟ้ามียุทธวิธีเปรียบเทียบกับแรงดันอินพุตและเอาต์พุต เพื่อตรวจสอบสถานะการทำงานของวงจรให้ได้ระดับแรงดันที่



รูปที่ 6 แสดงสัญญาณที่ออกจากขา 10 และ 11

ต้องการ ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 9 สัญญาณป้อนกลับที่ได้รับจากเซนเซอร์วัดความเร็วจะมีความต้านทาน R1 และ R2 ต่ออยู่เพื่อลดขนาดแรงดันของสัญญาณป้อนกลับไม่ให้เกินแรงดันอ้างอิงสูงสุด R3 และ R4 จะเป็นตัวควบคุมกระแสอินพุตให้แก่ ออปแอมป์ R_u จะเป็นตัวควบคุมกระแสไบอัสให้แก่ Q1 เพื่อทำการขยายสัญญาณการจุดชนวนมอสเฟตซึ่งอาศัยหลักการเดียวกับ IGBT (Yuvarajan, 1990) และ R_c ให้การควบคุมกระแสไบอัส ส่วน R5 C1 และ ZD2 ช่วยรักษาแรงดันไบอัสให้คงที่ไม่เกินพิกัดของมอสเฟตนั้นๆ และที่สำคัญจะต้องมีวงจรป้องกันแรงดันชั่วครู่ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของภาระที่ขา D และขา S ประกอบด้วย C4 R6 และ D2 ในช่วงเวลาหยุดนำกระแสของสวิตช์เมื่อขั้วภาระที่มีสมบัติเป็นความเหนียวน่าเช่น มอเตอร์ กระแสจะยังคงไหลผ่าน D1 มายังภาระอย่างต่อเนื่อง วงจรสับไฟฟ้าแบบนี้จะเป็นวงจรสับไฟฟ้าแบบลดค่าลง เนื่องจากแรงดันเริ่มต้นของแบตเตอรี่จะมีค่าสูง จึงต้องควบคุมแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์ในระดับที่ไม่เกินพิกัด

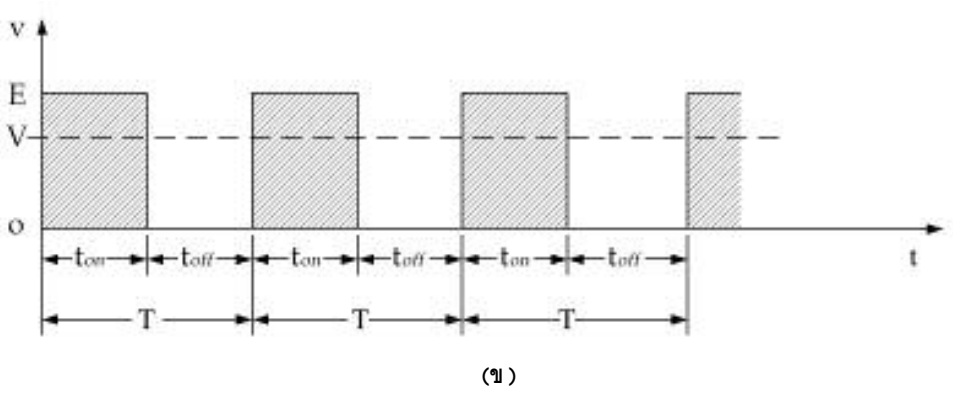
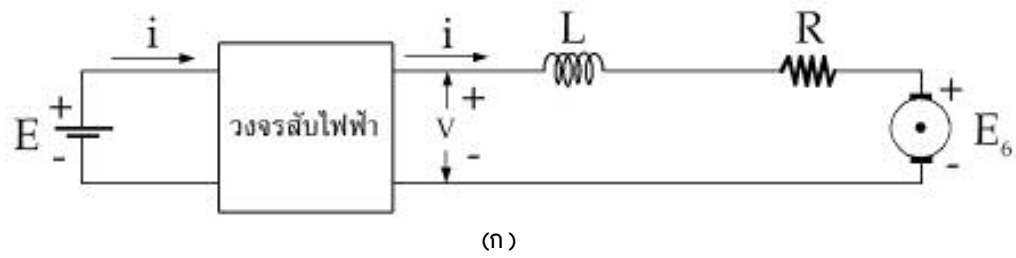


รูปที่ 7 กราฟสี่เหลี่ยมด้านบนเป็นสัญญาณที่ออกมาแปลงซึ่งมีระดับแรงดัน 288 V_{P-P} และเมื่อผ่านวงจรเรกติฟายเออร์ จะได้รูปคลื่นด้านล่างที่มีขนาดแรงดัน 288 Vdc

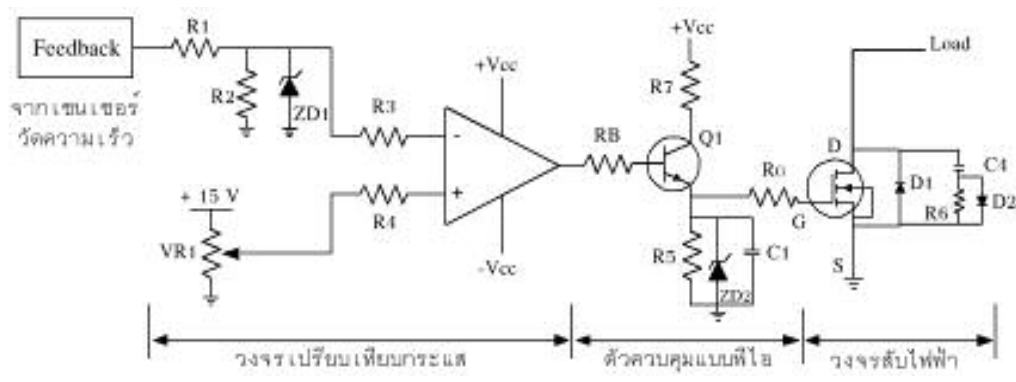
หลักการควบคุมความเร็วมอเตอร์ด้วย วงจรสับไฟฟ้าและผลการทดสอบการควบคุม

การควบคุมความเร็วมอเตอร์ด้วยวงจรสับไฟฟ้า อาจแทนได้ด้วยแผนภาพในรูปที่ 10 ระบบรวมประกอบด้วยตัวควบคุมการสับไฟฟ้าของวงจรสับไฟฟ้าแบบลดค่าลง ที่ใช้แบบลดค่าลงเพราะคอนเวอร์เตอร์ให้แรงดัน 288 V ป้อนเข้าวงจรสับไฟฟ้า และยังประกอบด้วยมอเตอร์กระแสตรงชนิดวงจรสนามแยกส่วน เช่น เซอร์โวตัวอัตราเร็ว อัตราเร็วรอบของมอเตอร์ต้องคงที่ที่ 2500 rpm ซึ่งสามารถคงค่าไว้ได้ด้วยการป้อนกลับด้วยเซนเซอร์วัดอัตราเร็ว ซึ่ง

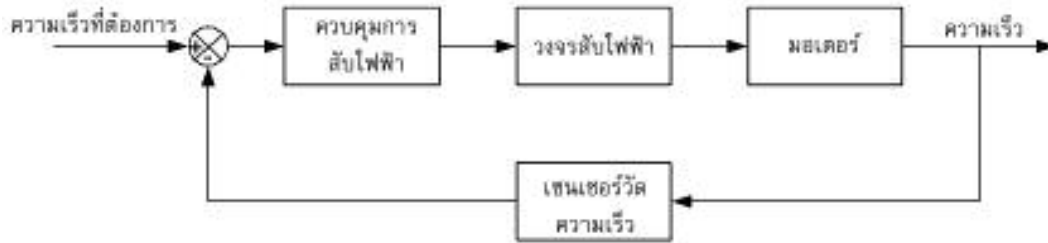
ให้แรงดันเอาต์พุต 50 Vdc สมัยกับอัตราเร็ว 2500 rpm เมื่อทำการทดสอบด้วยการปรับแรงดันวงจรสนามให้คงที่ที่ พิกัดมีแบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานผ่านคอนเวอร์เตอร์ ในการทดสอบนี้ให้ควบคุมความเร็วที่ 2500 rpm รูปที่ 11 แสดงสัญญาณไปป์สแก็มอสเฟต ทำการสับไฟฟ้าควบคุมความเร็วของมอเตอร์ให้คงที่ แรงดันเริ่มต้นขณะทำการทดลองป้อนวงจรรวมเจอร์เป็น 240 Vdc ความถี่ในการสับไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันที่ป้อนให้กับวงจรลดลงดังแสดงในรูปที่ 12 ถึง 14 เมื่อระดับของแรงดันลดลงจนถึง 188 V ซึ่งเป็นแรงดันที่ต่ำมาก ๆ จนวงจรสับไฟฟ้าไม่สามารถจะรักษาระดับการควบคุมไว้ได้



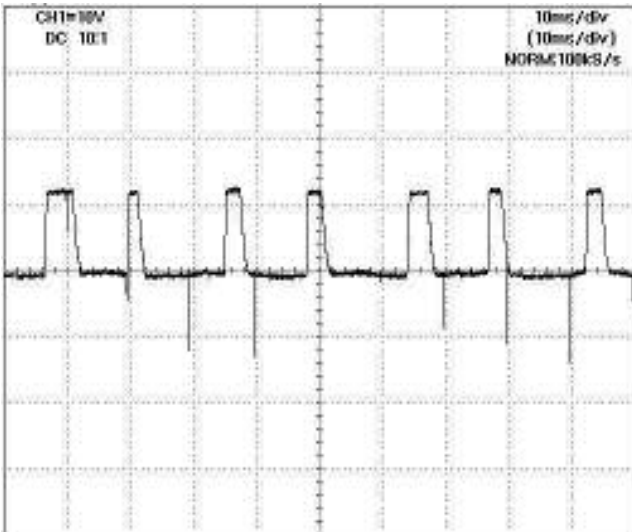
รูปที่ 8 รูปคลื่นแสดงการทำงานของวงจรสับไฟฟ้า



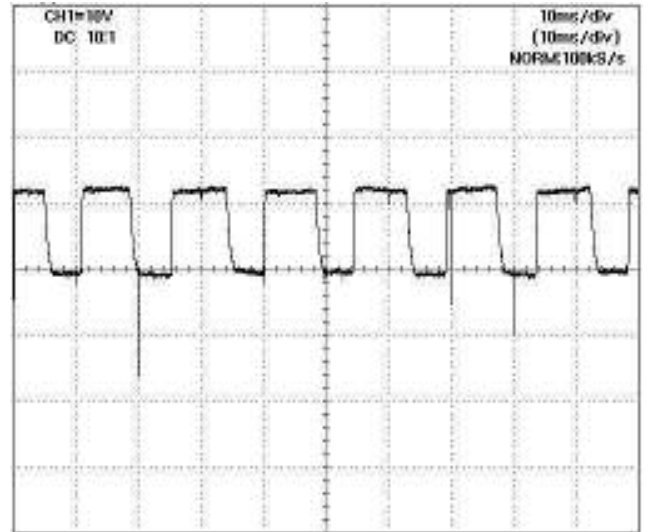
รูปที่ 9 วงจรควบคุมการสับไฟฟ้าแบบป้อนกลับและวงจรสับไฟฟ้า



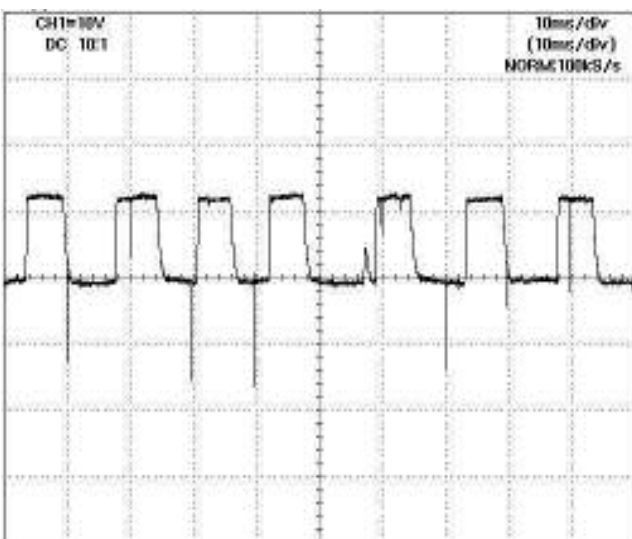
รูปที่ 10 แผนภาพบล็อกการควบคุมความเร็วมอเตอร์



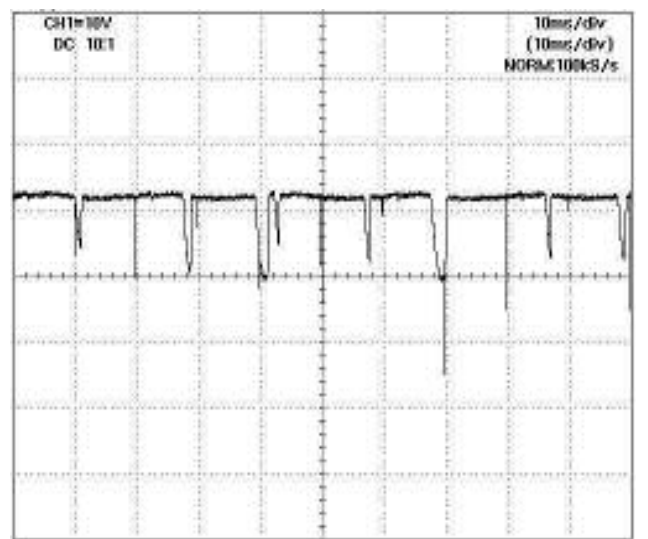
รูปที่ 11 สัญญาณจุดชนวนมอสเฟตช่วงพัลส์สี่เหลี่ยมเป็นช่วงที่มอสเฟตนำกระแสแรงดันเฉลี่ยเอาต์พุตรักษาไว้ที่ 220 Vdc ขณะที่อินพุตของวงจรสับไฟฟ้าเป็น 240 Vdc



รูปที่ 13 สัญญาณจุดชนวนทำนองเดียวกับรูปที่ 11 เว้นแต่กรณีนี้เป็นการป้อนอินพุตเท่ากับ 220 Vdc

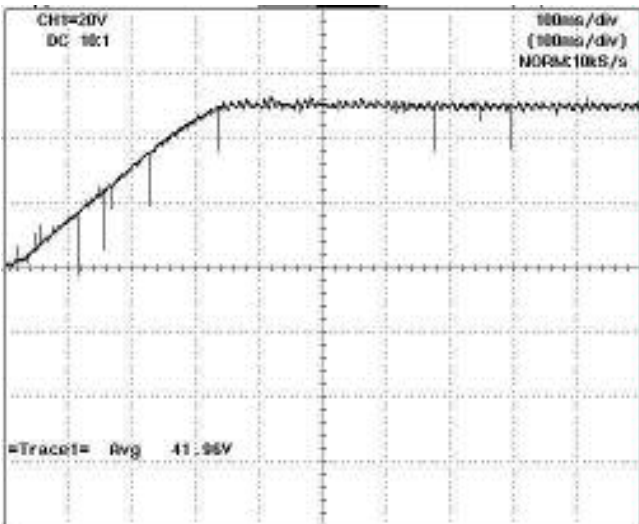


รูปที่ 12 สัญญาณจุดชนวนทำนองเดียวกับรูปที่ 11 เว้นแต่กรณีนี้เป็นการป้อนอินพุตเท่ากับ 235 Vdc



รูปที่ 14 สัญญาณจุดชนวนทำนองเดียวกับรูปที่ 11 เว้นแต่กรณีนี้เป็นการป้อนอินพุตเท่ากับ 200 Vdc

รูปที่ 15 ระบบที่ใช้ทดสอบ



รูปที่ 16 สัญญาณป้อนกลับที่ได้จากเซนเซอร์วัดความเร็วจากช่วงเริ่มเดินเครื่องจนถึงสภาวะคงตัวที่ระดับอัตรา 2500 rpm

สรุป

จากการทดสอบกับระบบที่แสดงในรูปที่ 15 ทำให้ทราบถึงขอบเขตในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ชนิดวงจรถูกแยกส่วนด้วยวงจรสับไฟฟ้า โดยมีแบตเตอรี่ตะกั่วกรดเป็นแหล่งพลังงานวงจรถูกทำงานได้ผลดีตามวัตถุประสงค์ กล่าวคือสามารถรักษาความเร็วรอบที่ 2500 rpm ของภาระให้คงที่ได้ แต่จะต้องหยุดการขับเคลื่อนภาระทันทีก่อนที่แรงดันแบตเตอรี่ จะลดระดับจน

มอเตอร์เครื่องสี่ข้วขนาดเล็กแบบเคลื่อนที่ ที่ต้องใช้ความเร็วรอบที่เหมาะสม จึงจะได้ขั้วที่ไม่หักคุณภาพดี วิธีการที่น่าเสนอมีข้อดีคือ การปรับเปลี่ยนสัญญาณการควบคุมเกิดขึ้นแบบต่อเนื่องทันทีทันใด เมื่อได้รับผลตอบสนองจากสัญญาณป้อนกลับรูปที่ 16 แสดงอัตราเร็วของมอเตอร์ภายใต้การควบคุม มอเตอร์ใช้เวลาเริ่มเดินเครื่อง 350 มิลลิวินาที จึงให้อัตราความเร็วรอบคงตัวที่ 2500 rpm เทคนิคที่น่าเสนอช่วยลดความสูญเสียและความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับแบตเตอรี่ มอเตอร์ และผลผลิต เมื่อแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงแบบชั่วขณะ อีกทั้งอุปกรณ์ยังคงทนต่อสภาพภูมิอากาศและฝุ่นละอองได้ดี อุปกรณ์ทั้งหมดสามารถหาได้ภายในประเทศ การบำรุงรักษาสามารถทำได้โดยง่ายและไม่ต้องการการดูแลรักษามากมายนัก



เอกสารอ้างอิง

1. Nelson, P. J., and Bolin, D. W. (1995). Basics and advances in battery systems. IEEE Transactions On Industry Applications. 31(2) :419 - 428.
2. Pressman, J.A. (1999). Switching Power Supply Design. (2nd ed.). United States of America : McGraw-Hill .
3. Salameh, M.Z., Casacca, M.A., and Lynch, W.A. (1992). A mathematical model for lead-acid Battery. IEEE Transactions On Energy Conversion. 7(1):93-98.
4. Yuvarajan, S. (1990). Switching Characteristics of An IGBT. IEEE Transactions On Industrial Electronics. : 1589 - 1593



"ใช้ไฟอย่างประหยัด จะช่วยรัฐพัฒนาประเทศ"