บทที่1

บทนำ

ในปัจจุบันมีการใช้ยานพาหนะขนส่งกันเป็นจำนวนมาก ยานพาหนะเหล่านั้นใช้เชื้อเพลิงในการสันดาป ในปัจจุบันน้ำมันเชื้อเพลิงมีราคาสูงมากและกำลังจะลดลง จึงได้มีการพัฒนาการนำพลังงานไฟฟ้ามาใช้ในการขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ โดยใช้มอเตอร์กระแสตรงขนาด 24 โวลท์ 500 วัตต์ และเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานจริงและนำไฟฟ้ามาเป็นพลังงานเป็นการลดมลภาวะทางอากาศและเป็นการประหยัดพลังงานมากขึ้น

1.1 ความสำคัญของปัญหา

1. ลดการใช้น้ำมันและก๊าซธรรมชาติที่มีราคาค่อนข้างที่จะสูง
2. เกิดความสะดวกและประยุกต์ใช้อิเล็กทรอนิกส์กำลังให้เป็นประโยชน์
3. ไม่มีมลพิษและรักษาสิ่งแวดล้อมที่จะเกิดขึ้น
4. ลดค่าใช้จ่ายในการเดินทางและช่วยประหยัดพลังงาน

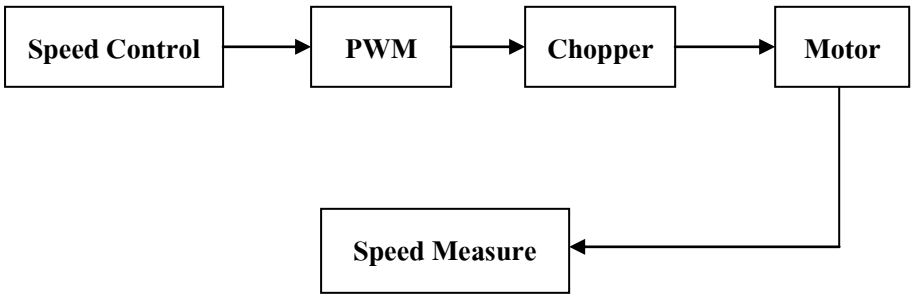
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1. เพื่อสร้างรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
2. เพื่อให้รถสามารถวิ่งได้ที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และรับน้ำหนักโดยรวมไม่เกิน 180 กิโลกรัม
3. เพื่อศึกษาวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้วงจรชอปเปอร์แบบ 2 ควอตแดนซ์
4. เพื่อประยุกต์หลักการของอิเล็กทรอนิกส์กำลังและแสดงผลแบบดิจิตอล
5. เพื่อวิเคราะห์หลักการทำงานของตัวขับเคลื่อน

1.3 ขอบเขตของโครงงาน

1. สร้างตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ไซด์ไฟฟ้าโดยใช้วงจรชอปเปอร์
2. ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 500 วัตต์ 24 โวลท์ เป็นต้นต้นกำลังในการขับเคลื่อน
3. ใช้วงจรดีซีชอปเปอร์แบบ 2 ควอตแดนซ์ ในการควบคุมมอเตอร์เป็นการเบรกแบบ Regenerative
4. วัดขนาดความเร็วและแสดงผลแบบดิจิตอล

1.4 โครงสร้างของโครงงาน



ภาพที่ 1.1 โครงสร้างของโครงงาน

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงงาน

1. เพื่อเป็นการอนุรักษ์พลังงานในการขับเคลื่อนเครื่องยนต์
2. มีความสะดวกในการใช้งานเนื่องจากการดูแลรักษาทำได้ง่าย
3. มีความประหยัดกว่าเพราะไม่ใช้น้ำมันในการขับเคลื่อน
4. เพื่อเป็นยานพาหนะแบบไร้มลพิษเพราะใช้ไฟฟ้าในการขับเคลื่อนเครื่องยนต์

1.6 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

1. เดชนะ ทีฆายุพรรค,ณัฐพล ม่วงบาง, ปิยพงษ์ สุขรักษ์, ปรากฤต เหลี่ยงประดิษฐ์, 2549 : การปรับปรุงระบบส่งจ่ายกำลังของรถจักรยานยนต์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในการขับเคลื่อนรถให้สามารถวิ่งได้ที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวรขนาดกำลังไฟฟ้า 500 วัตต์ แรงดันไฟฟ้า 24 โวลท์ ควบคุมความเร็วมอเตอร์โดยใช้วงจรชอปเปอร์และมีการติดตั้งชุดชาร์จประจุแบตเตอรี่ไว้กับตัวรถเพื่อความสะดวกในการใช้งาน

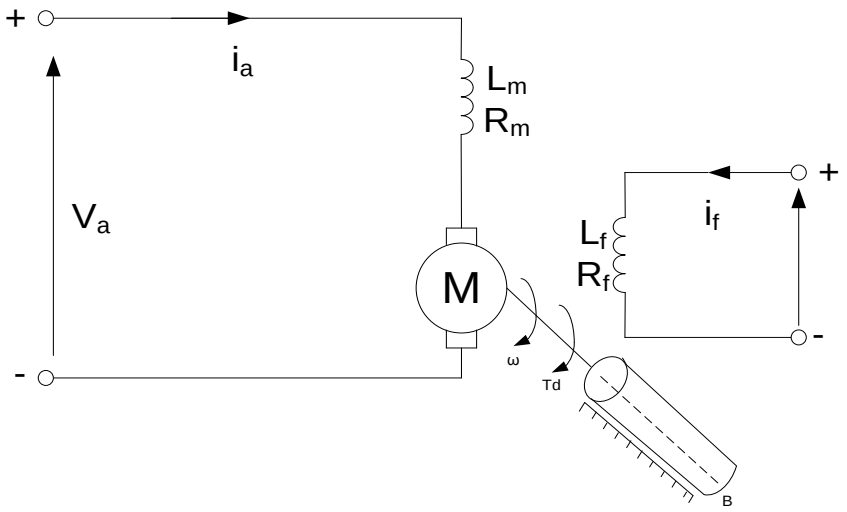
2. นครินทร์ แจ่มนิล, สมบูรณ์ เอี่ยมอากาศ,ดำรงศ์ ผ่องศรี, นิมิต บุญภิรมย์, 2551 : นำเสนอรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ทำการออกแบบและสร้างรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าที่สามารถปรับความเร็วได้ โดยใช้ ดีซีมอเตอร์ ขนาด 36 โวลท์ เป็นตัวขับเคลื่อน โดยติดตั้งมอเตอร์ไว้ที่ล้อหลังและใช้โซ่เป็นตัวส่งกำลังจากเฟืองหน้าซึ่งติดกับมอเตอร์สามารถวิ่งด้วยความเร็วประมาณ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 คุณลักษณะพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง [1]

วงจรเทียบเคียงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก มีลักษณะดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 วงจรเทียบเคียงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก

เมื่อมอเตอร์ถูกกระตุ้นด้วยกระแสที่ฟิวส์ (i_f) และกระแสที่อาร์เมเจอร์ (i_a) ภายในวงจรอาร์เมเจอร์ขอมอเตอร์ทำให้เกิดแรงดันแรงดันต้านกลับ (BackEmf) และแรงบิดที่โหลด ณ ระดับความเร็วคงที่ i_f ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกไม่ได้ขึ้นอยู่กับนั้นคือหมายถึงการเปลี่ยนแปลงใด ๆของ ไม่มีผลกระทบต่อ i_f นอกจากนี้ i_f ยังมีค่ามากกว่า i_a นี้มากๆจากภาพที่ 2.1 เราสามารถหาค่ากระแสที่ฟิวส์ชั่วขณะ

ได้สมการ

$$V_f = R_f I_f + L_f \frac{dt}{dt} \tag{2.1}$$

หาค่ากระแสอาร์เมเจอร์ชั่วขณะได้จากสมการ

$$V_a = R_a I_a + L_a \frac{dia}{dt} + e_g \tag{2.2}$$

แรงดันต้านกลับ (e_g) ของมอเตอร์ซึ่งรียกว่า แรงดันความเร็ว (Speed Voltage) มีค่าเป็น

$$e_g = K_v \omega i_f \tag{2.3}$$

แรงบิดที่อาร์เมเจอร์ (Torque Developed ; Td) มีค่าเป็น

$$\tau_d = K_t i_f i_a \tag{2.4}$$

τ_d มีค่าเท่ากับแรงบิดที่ส่งไปยังโหลด ดังนี้

$$\tau_d = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + \tau_L \tag{2.5}$$

เมื่อ

ω = ความเร็วเชิงมุมหรือความเร็วมอเตอร์ มีหน่วยเป็นเรเดียลต่อวินาที (rad/s) หรือ รอบต่อนาที (rpm)

B = ค่าคงที่ของแรงเสียดทานมีหน่วยเป็นN.m/ เรเดียลต่อวินาที (rad/s)

K_v = ค่าคงที่ของแรงดัน มีหน่วยเป็นโวลต์ต่อแอมแปร์- เรเดียลต่อวินาที (V/A-rad/s)

$K_t = K_v$ = ค่าคงที่ของแรงบิด

L_a = อินดักแตนซ์ของวงจรอาร์เมเจอร์ มีหน่วยเป็นเฮนรี่ (H)

L_f = อินดักแตนซ์ของวงจรฟิลด์ มีหน่วยเป็นเฮนรี่ (H)

R_a = ความต้านทานของวงจรอาร์เมเจอร์ มีหน่วยเป็น (Ω)

R_f = ความต้านทานของวงจรฟิลด์ มีหน่วยเป็น (Ω)

ขณะสภาวะคงที่ (Steady State) ค่าอนุพันธ์เวลา (Time Derivatives; dt) จากสมการเหล่านี้เป็นศูนย์เป็นผลให้ปริมาณต่าง ๆ ที่ปรากฏในสมการข้างบนนี้ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงที่ ดังนี้คือ

$$V_f = R_f I_f \tag{2.6}$$

$$E_g = K_a \omega I_f \tag{2.7}$$

$$V_a = R_a I_a + E_g$$

$$= R_a I_a + K_v \omega I_g \tag{2.8}$$

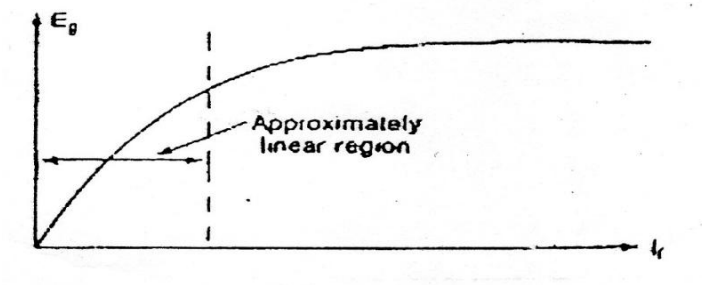
$$\tau_d = K_t I_f I_a$$

$$= B\omega + \tau_d \tag{2.9}$$

กำลังไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์ (Developed Power; P_d) มีค่าเป็น

(2.10)

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสฟิลด์ (i_f) กลับแรงดันต้านกลับ (E_g) จะได้ว่าไม่เป็นเชิงเส้นเนื่องจากการอิ่มตัวแม่เหล็ก ซึ่งเห็นได้จากคุณลักษณะของการเกิดแม่เหล็ก (Magnetization Characteristic) ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสฟิลด์ (i_f) กับแรงดันต้านกลับ (E_g)

หาค่าความเร็วเชิงมุมหรือความเร็วของมอเตอร์ได้จากสมการ คือ

$$\omega = \frac{Va - R_a I_a}{K_v\ I_f} = \frac{V_a - R_a\ I}{K_v\ I_f / R_f} \tag{2.11}$$

จากสมการ 2.9 ทำให้ทราบว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ทำได้โดย

1. ควบคุมแรงดันที่อาร์เมเจอร์ V_a ซึ่งเรียกว่า การควบคุมแรงดัน
2. ควบคุมกระแสที่ฟิลด์ ซึ่งเรียกว่า การควบคุมกระแสฟิลด์
3. ควบคุมกระแสที่อาร์เมเจอร์ (I_a) ขณะ (I_f) มีค่าคงที่

ความเร็วซึ่งสอดคล้องกับค่าพิกัดของ ค่าพิกัดของ และค่าพิกัดของ จะเรียกว่าความเร็วฐาน (Base Speed) หรือความเร็วพิกัด

สำหรับคุณลักษณะของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกนี้เมื่อมีการนำสมการ 2.9 มาร่วม พิจารณาทำให้ทราบว่า :

กรณีความเร็วของมอเตอร์ต่ำกว่าความเร็ว หรือฐานเร่งความเร็วให้ถึงความเร็วฐาน ค่า จะคงที่ ดังนั้น เมื่อความเร็วของมอเตอร์ต่ำกว่าความเร็วฐาน จึงขึ้นอยู่กับการปรับค่าของแรงดันอาร์เมเจอร์ (V_a) เพื่อให้ได้แรงบิดคงที่

กรณีความเร็วของมอเตอร์สูงกว่าความเร็วฐาน ค่าแรงดันอาร์เมเจอร์ (V_a) จะคงที่ ดังนั้นความเร็วของมอเตอร์จึงขึ้นอยู่กับการปรับค่าของ I_f (เพื่อให้ได้ P_d คงที่)

2.2 ทฤษฎีพื้นฐานของวงจรควบคุม

วงจรควบคุมนี้จะเป็นวงจรที่ใช้เปลี่ยนแปลงแรงดันกระแสตรงจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแรงดันระดับหนึ่งไปเป็นอีกระดับหนึ่ง การนำไปใช้งานส่วนมากจะเปลี่ยนแรงดันเพื่อจ่ายให้กับอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์กระแสตรง เพื่อช่วยในการเริ่มเดินและควบคุมความเร็วของมอเตอร์ และยังสามารถใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่เปลี่ยนแปลงแรงดันได้สะดวก

หลักการเบื้องต้นของวงจรควบคุม สามารถพิจารณาจากวงจรพื้นฐานในวงจรประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสวิทซ์โหลดเป็นความต้านทานของวงจรที่ใช้งานจริงจะใช้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ เอสซีอาร์มอสเฟสและไอจีบีที ทำหน้าที่เป็นสวิทซ์ แต่ในโครงงานนี้จะใช้ ไอจีบีทีเป็นสวิทซ์ซึ่งตอบสนองความถี่ได้สูงเมื่อปิดสวิทซ์ แรงดันที่โหลดจะเท่ากับแรงดันที่แหล่งจ่าย เมื่อเปิดสวิทซ์ แรงดันที่โหลดจะเท่ากับศูนย์และแรงดันเฉลี่ยที่โหลดจะเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาที่ปิดสวิทซ์และเปิดสวิทซ์ จึงเรียกวิธีนี้ว่า“ชอปเปอร์” หรือ D.C – to - D.C.

ถ้าช่วงระยะเวลาที่สวิทซ์เปิด-ปิดเปลี่ยนแปลงแตกต่างกัน ก็จะทำให้แรงดันที่โหลด (V_0) และกระแสที่โหลดเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะมีค่าแรงดันเฉลี่ยและจะมีความสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่าย ดังนี้

T_{on} = ระยะเวลาที่สวิทซ์ปิด

T_{off} = ระยะเวลาที่สวิทซ์เปิด

T = ระยะเวลาในหนึ่งไซเคิ้ล = $T_{on} + T_{off}$

$$V_{0(ave)} = \frac{1}{T}\int_0^t V_s \tag{2.12}$$

$$= \frac{V_{s(t)}}{T}\int_0^{T_{on}}$$

$$= \frac{T_{on}}{T}\cdot V_s$$

$$V_{0(ave)} = K \cdot V_s \tag{2.13}$$

ซึ่งค่า $K = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}}$ = อัตราส่วนระยะเวลาเปิดและเวลาปิด

= DutyCycle

$$V_{r.m.s} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^{T_{on}} V_s^2(t)\,dt} \tag{2.14}$$

$$= V_s \cdot \sqrt{k} \tag{2.15}$$

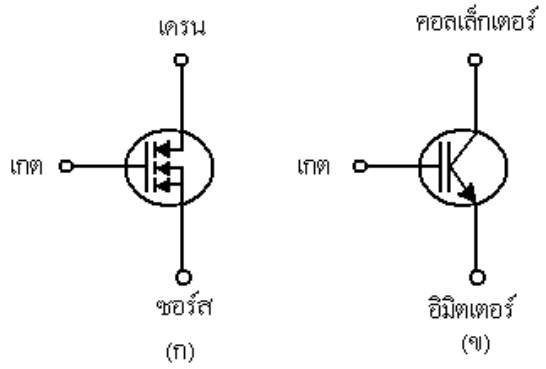
ลักษณะการเปิด-ปิดสวิทซ์ในวงจรควบคุม สามารถแบ่งออกได้ 3 ลักษณะคือ

1) เปลี่ยนแปลง และ เปลี่ยนแปลง แต่ T คงที่จะเรียกการทำงานลักษณะนี้ว่า “วิธีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของพัลส์” (Pulse Modulation) แรงดันที่โหลดจะมีค่าลดลงเมื่อ ลดลง

2) คงที่และ เปลี่ยนแปลง แต่ T เปลี่ยนแปลงจะเรียกการทำงานลักษณะนี้ว่า “วิธีการเปลี่ยนแปลงความถี่”(Frequency Modulation) แรงดันที่โหลดจะมีค่าลดลงเมื่อ มากขึ้น

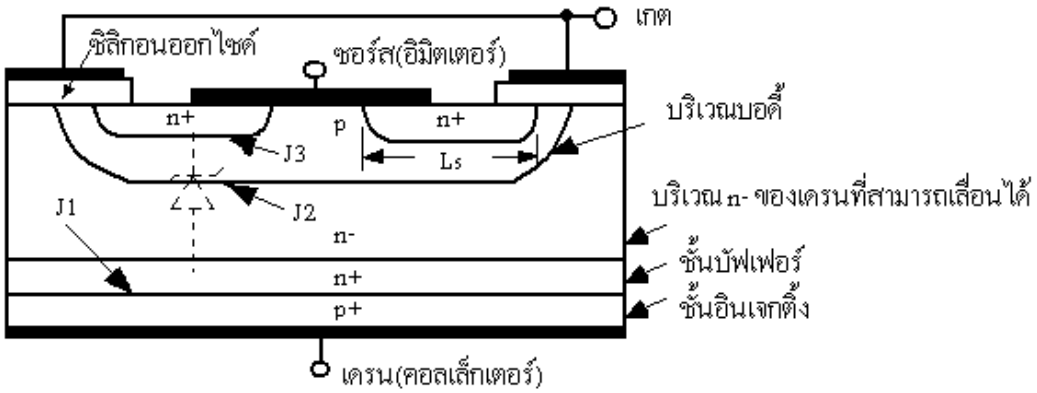
3) ลักษณะการทำงานของการเปลี่ยนแปลงความกว้างของพัลส์และเปลี่ยนแปลงความถี่ ซึ่งแบ่งได้ 2 กรณี คือ เปลี่ยนแปลง และ คงที่ แต่ T เปลี่ยนแปลงและ เปลี่ยนแปลง และ เปลี่ยนแปลง และ T เปลี่ยนแปลงเมื่อพิจารณาจากวงจรแล้วนั้นจะเห็นว่าจะมีแรงดันเอาท์พุทที่เป็นภาพ Wave Form ที่จะเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้อย่างไรวิธีแก้ก็คือ สวิทซ์ที่ใช้จะต้องใช้กับสัญญาณที่มีความถี่สูงๆจึงจะมองไม่ออกว่าเป็น Wave Form

2.3 ไอจีบีที (IGBT) ย่อมาจาก Insulate Gate Bipolar Transistor[2]



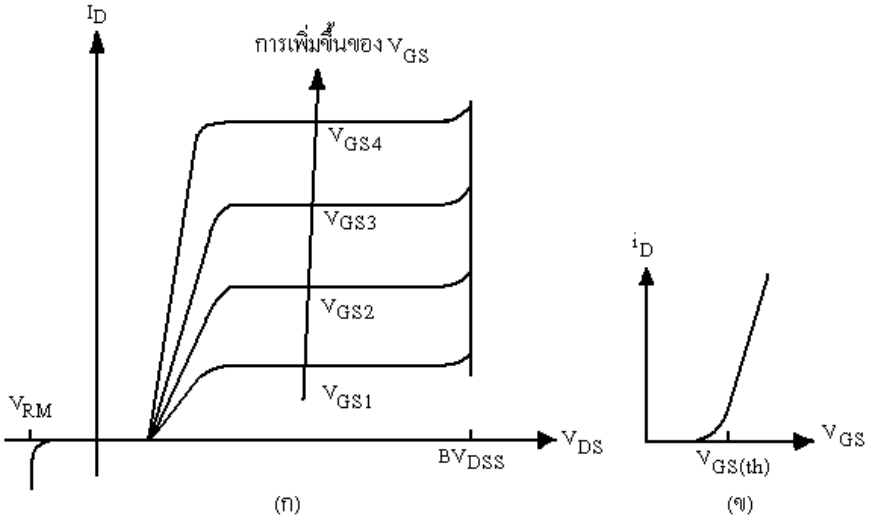
ภาพที่ 2.3 สัญลักษณ์ของไอจีบีทีทั้ง 2 แบบ

ไอจีบีทีค่อนข้างจะเป็นอุปกรณ์ที่ใหม่อยู่แต่พอจะมีใช้กันบ้างในปัจจุบันและมีจำหน่ายกันหลากหลายเบอร์ด้วยกันในปัจจุบันจึงมีสัญลักษณ์อยู่หลายรูปแบบด้วยกันซึ่งขึ้นอยู่กับผู้ผลิตว่าจะมีการกำหนดสัญลักษณ์ใดๆเป็นสัญลักษณ์ประจำสินค้าที่ผลิตขึ้นส่วนมากจะมีอยู่ 2 แบบดังภาพที่ 2.3 ซึ่งเป็นสัญลักษณ์และชื่อเรียกขาต่างๆของไอจีบีทีชนิดเอ็นแชนเนลจากภาพที่ 2.3 ก. จะเห็นว่ามีสัญลักษณ์คล้ายกับมอสเฟสมากๆ เพียงแต่สัญลักษณ์จะมีลูกศรเพิ่มขึ้นมาตรงขาเดรนลักษณะของลูกศรจะชี้เข้าหาตัวหรือชี้เข้าหาชั้นของซิลิคอนภายในตัวไอจีบีทีส่วนสัญลักษณ์ของภาพที่ 2.3 ข. จะเหมือนกับสัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์แต่ตรงขาเกตหรือขาเบสของทรานซิสเตอร์ จะเพิ่มขีดขึ้นมาอีกหนึ่งขีดเพื่อให้เห็นว่าขีดที่เพิ่มมานั้นไม่ได้ต่อถึงกันโดยตรงกับขาที่ต่อออกมาใช้ภายนอก



ภาพที่ 2.4 ภาพหน้าตัดโครงสร้างพื้นฐานของไอจีบีที

โครงสร้างของไอจีบีทีชนิดเอ็นแชนเนลแสดงเป็นภาพตัดขวางได้ดังภาพที่ 2.4 โครงสร้างส่วนมากจะมีลักษณะเหมือนมอสเฟสจะแตกต่างกันตรงที่ไอจีบีทีจะมีชั้น P+ หรือชั้นอิงเจ็ทติ้งจะต่ออยู่ระหว่างขาเดรนซึ่งในที่นี้มอสเฟสจะไม่มีและจากการที่ขาเกทถูกกั้นด้วยชั้นของซิลิคอนออกไซด์ (SiO2) เป็นผลทำให้ความต้านทานอินพุตที่ขาเกตมีค่าสูงมากเหมือนกับเพาเวอร์มอสเฟส โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ช่วง 10 กิกะโอห์ม



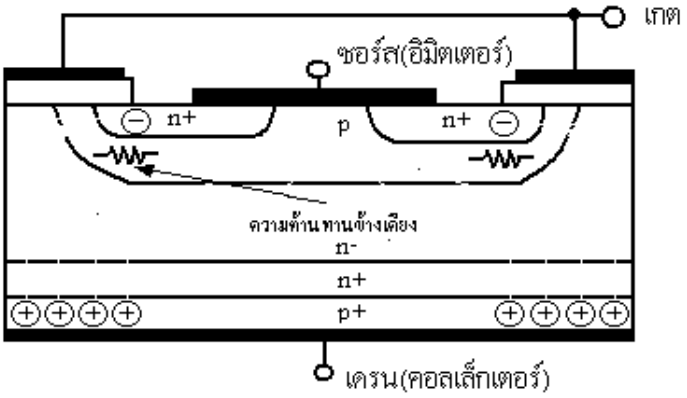
ภาพที่ 2.5 โครงสร้างของไอจีบีทีชนิดเอ็นแชนเนล

ก. กราฟแสดงคุณสมบัติระหว่างกระแสและแรงดันของไอจีบีที

ข. กราฟแสดงลักษณะสมบัติการถ่ายโอนของไอจีบีที

จากผลดังกล่าวทำให้ลักษณะของกราฟแสดงคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของไอจีบีทีมีลักษณะคล้ายกับระหว่างขาเกตและขาซอร์สมากกว่า การควบคุมกระแสที่ขานี้จะเหมือนกับตัวทรานซิสเตอร์ซึ่งกราฟแสดงแสดงคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของไอจีบีทีแสดงดังภาพที่ 2.5 ก. และภาพที่ 2.5 ข. เป็นกราฟคุณสมบัติการถ่ายโอนกระแสและแรงดันกราฟของทรานซิสเตอร์แต่การควบคุมกระแสเดรนจะอาศัยการควบคุมแรงดัน จากภาพกราฟแสดงให้เห็นว่าส่วนใหญ่ของเส้นกราฟก็จะมีคุณลักษณะเป็นเส้นตรงแต่จะเริ่มโค้งก็ต่อเมื่อกระแสเดรนต่ำๆนั่นก็คือจุดที่แรงดันระหว่างขาเกตและขาซอร์สต่ำลงเข้าใกล้แรงดันจุดเริ่มเปลี่ยนสภาวะการทำงานที่จุด (Threshold Voltage:VGS(th)) โดยถ้าแรงดันระหว่างเกตและซอร์สนี้ต่ำกว่าแรงดันที่จุด VGS(th) แล้วไอจีบีทีจะอยู่ในสภาวะหยุดนำกระแสหรือคัทออฟในกรณีของไอจีบีทีชนิดพีแชนเนลนั้นคุณสมบัติจะคล้ายกับเอ็นแชนเนลแต่โครงสร้างและสัญลักษณ์มีลักษณะตรงกันข้ามกับเอ็นแชนเนล

2.3.1 สภาวะนำกระแส



ภาพที่ 2.6 ทิศทางการไหลของอิเล็กตรอนและโฮลในขณะนำกระแส

ขาเดรนเมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรงคือเป็นบวกเมื่อเทียบกับซอร์สและแรงดันระหว่างเกตกับซอร์สมีค่าเกิน VGS(th) ประจุไฟฟ้าบวกที่เกิดจากแรงดันที่ขาเกตจะดึงเอาอิเล็กตรอนคือกระแสอิเล็กตรอนที่ไหลจากขาซอร์สผ่านบริเวณใต้เกตมายังบริเวณรอยเลื่อน n- จะรวมกับโฮลจะที่เป็นพาหนะข้างน้อยที่ถูกฉีดมาจากชั้นอินเจ็ทติ้งp+เพราะที่รอยต่อJ1ได้รับแรงดันไบอัสตรง ทำให้ไอจีบีทีอยู่ในสภาวะนำกระแสเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าจากเดรนไปยังซอร์สได้การรวมกันของโฮลและอิเล็กตรอนภายในบริเวณ n- เรียกว่าการมอดูเลตสภาพการนำกระแสผลการมอดูเลตนี้จะทำให้ความต้านทานของบริเวณ n- มีค่าต่ำลงเป็นการเพิ่มความสามารถในการขับผ่านกระแสได้สูงขึ้นซึ่งมีลักษณะเหมือนเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ผลของความต้านทานที่ลดลงทำให้แรงดันตกคร่อมที่สภาวะนำกระแสลดต่ำลงด้วยการสูญเสียกำลังงานขณะนำกระแสจึงลดลงด้วยทิศทางการไหลของอิเล็กตรอนและโฮล

2.3.2 สภาวะหยุดนำกระแส

เมื่อแรงดันระหว่างขาเกตและซอร์สลดลงต่ำกว่าแรงดัน VGS(th) จะทำให้มีแรงดันที่ไม่เพียงพอสำหรับการแปรสภาพชั้นบอดี้ p เป็น n ได้ทำให้บริเวณ n-ไม่ตรงกับบริเวณซอร์ส n+ไอจีบีทีจึงจะอยู่ในสภาวะหยุดนำกระแสและในสภาวะนี้รอยต่อ J2 ที่ได้รับแรงดันไบอัสกลับจะทำให้เกิดกระแสรั่วไหลเพียงเล็กน้อยเท่านั้นและนอกจากนี้ยังทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้นที่รอยต่อJ2ด้วยบริเวณปลอดพาหะนี้จะมีการขยายบริเวณกว้างขึ้นจนเกินเข้ามายังบริเวณ n- มากกว่าที่จะขยายไปยังบริเวณชั้นบอดี้ p เพราะชั้นบอดี้ p มีความหนาแน่นของสารที่โด๊ปบริเวณรอยเลื่อย n-

มากเพียงพอก็จะทำให้เกิดการขยายของบริเวณปลอดพาหะที่ไม่สามารถแตะกับชั้นอินเจ็กติ้ง p- ได้ ชั้นบัฟเฟอร์ n+(Buffer Layer) ก็ไม่จำเป็นที่จะต้องทำให้เกิดขึ้นหรือไม่จำเป็นที่จะต้องโด๊ปสาเพิ่ม ทั้งนี้เพราะการแตะกันของบริเวณทั้งสองจะทำให้เกิดการพังทลายทางด้านไบอัสตรงสำหรับไอจีบีทีที่ไม่การโด๊ปสารในชั้นบัฟเฟอร์ n+ นี้จะเรียกว่าไอจีบีทีแบบสมมาตรซึ่งจะมีอัตราการทนแรงดันย้อนกลับ (VRM หรือ BVSDS) เหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ การลดบริเวณความหนาของ n- ลงแต่ยังคงความสามารถของอัตราทนแรงดันไบอัสตรงไว้ สามารถทำได้โดยเพิ่มของชั้นบัฟเฟอร์ n+ เข้าไปเพื่อป้องกันการแตะกันของบริเวณปลอดพาหะกับบริเวณอินเจ็กติ้ p+ ซึ่งจะเรียกไอจีบีทีชนิดนี้ว่าไอจีบีทีแบบไม่สมมาตร และจากการลดความหนาแน่นทำให้แรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสลดต่ำลงเป็นผลให้การสูญเสียกำลังงานลดน้อยลงด้วยแต่ข้อเสียของการเพิ่มของชั้นบัฟเฟอร์ n+ ก็คือ จะลดความสามารถของอัตราทนแรงดันด้านย้อนกลับให้เหลือน้อยลงเพียงไม่กี่สิบโวลต์ นั้นทั้งนี้เมื่อไอจีบีทีได้รับแรงดันไบอัสกลับที่ขาเดรน รอยต่อ J1 ซึ่งทั้งสองข้างมีความหนาแน่นในการโด๊ปของสารมาก จะไม่สามารถทนแรงดันด้านย้อนกลับได้สูง ดังนั้นไอจีบีทีชนิดนี้ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

2.3.3 การแลตช์ในไอจีบีที

นอกจากนี้โฮลส่วนใหญ่ที่รวมกับอิเล็กตรอนภายใต้บริเวณ n-แล้วยังมีกระแสโฮลบางส่วนที่ไหลข้ามบริเวณn- เข้าสู่บริเวณชั้นบอดี้pโดยตรงผลของกระแสโฮลนี้ทำให้เกิดแรงดันตกตร่อมความต้านทานข้างเคียงดังภาพที่ 2.6 ถ้าแรงดันนี้มีค่ามากพอคือประมาณ 0.7 โวลต์ จะทำให้รอยต่อ J3 ได้รับไบอัสตรง เป็นผลให้อิเล็กตรอนจากบริเวณซอร์ส n+ ถูกฉีดเข้ามาในชั้นบอดี้ p ถ้าดูจากภาพที่ 2.8 ค. จะหมายถึงขาเบสและอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็นจะได้รับแรงดันไบอัสตรงจะส่งผลให้ไทริสเตอร์ซึ่งแฝงอยู่ภายในโครงสร้างของไอจีบีทีจะอยู่ในสภาวะแลตช์การนำกระแสทำให้ที่ขาเกตไม่สามารถควบคุมปริมาณกระแสเดรนได้อีกต่อไปแต่การควบคุมของกระแสเดรนนี้จะขึ้นอยู่กับตัวต้านทานที่นำมาต่อในวงจรภายนอกถ้าหากมีการแล็ตช์เกิดขึ้นในวงจรเป็นเวลานาน อาจทำให้ไอจีบีทีเสียหายได้เพราะมีการสูญเสียกำลังงานเกินค่าพิกัดกระแสที่ทนได้ ส่วนใหญ่หรือมาตรฐานคู่มือการผลิตมักจะมีการบอกค่ากระแสเดรนสูงสุดที่สามารถไหลผ่านไอจีบีทีได้โดยยังไม่เกิดการแล็ตช์ขึ้น (IDM) แต่เนื่องจากกระแสเดรนถูกกำหนดหรือควบคุมโดยตรงจากแรงดันระหว่างขาเกตและซอร์สบางครั้งคู่มือบอกแรงดันที่สูงสุดระหว่างขาเกตและซอร์สสูงสุดการแลตช์ที่กล่าวถึงข้างต้นเรียกว่าการแลตช์ในหมดสแตติกเพราะเกิดขึ้นเมื่อกระแสที่ไหลในสภาวะการนำกระแสมีค่าเกิน IDM แต่ลักษณะการแลตช์นี้ก็สามารถเกิดขึ้นได้ เรียกว่าโหมดไดนามิกซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนการทำงานจากสภาวะนำกระแสไปเข้าสู่สภาวะหยุดนำกระแส

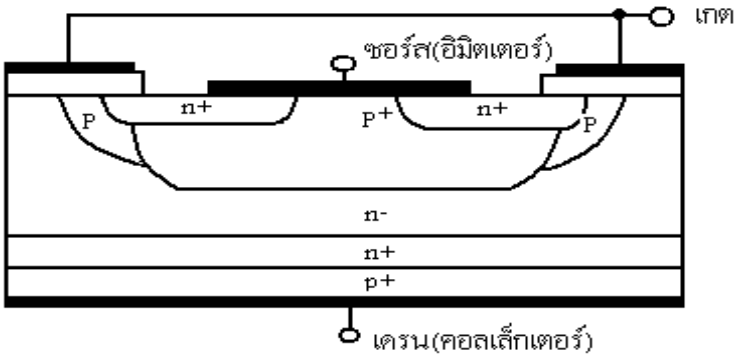
ได้ด้วยในบางครั้งการแลตช์นี้เกิดขึ้นได้แม้ว่ากระแสเดรนขณะนำกระแสยังมีค่าต่ำกว่าค่า IDM ก็ตามยังส่งผลที่เกิดขึ้นทำให้บริเวณปลอดพาหะที่มีการขยายบริเวณของชั้นบอดี้p โดยเฉพาะจะขยายเข้าสู่บริเวณ n- มากกว่า เพราะมีความหนาแน่นของการโด๊ปสารที่ต่ำกว่าการขยายบริเวณของปลอดพาหะอย่างรวดเร็ว จะทำให้โฮลที่ค้างอยู่บริเวณ n- ขณะนำกระแสและยังไม่ได้รวมกับอิเล็กตรอนหลุดรอดจากการขัดขวางของบริเวณปลอดพาหะเข้าไปสะสมอยู่ในบริเวณรอยต่อ J2 เป็นการเพิ่มกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานข้างเคียงให้สูงขึ้นทำให้ไทริสเตอร์ภายในไอจีบีทีเกิดการแลตช์ขึ้นได้ เมื่อเกิดการแลตช์ขึ้นนั้นแรงดันตกคร่อมขาซอร์สและเดรนขณะนำกระแสจะมีค่าต่ำกว่าระดับปกติ นอกจากนี้การแลตช์ยังสามารถเกิดขึ้นได้อีก

2.3.4 การป้องกันการแลตช์

การหลีกเลี่ยงการแลตช์ของไอจีบีทีสามารถทำได้ทั้งผู้ผลิตและผู้ใช้งานเอง โดยจะมีอยู่สองวิธีดังนี้

วิธีแรกอาจทำได้โดยลดความกว้างของบริเวณซอร์ส n+ ลงนั่นคือลดค่า Ls ลงนั่นเอง

วิธีที่สองเป็นการแบ่งระดับความหนาแน่นในการโด๊ปสารของบริเวณบอดี้ p ดังในภาพที่ 2.7



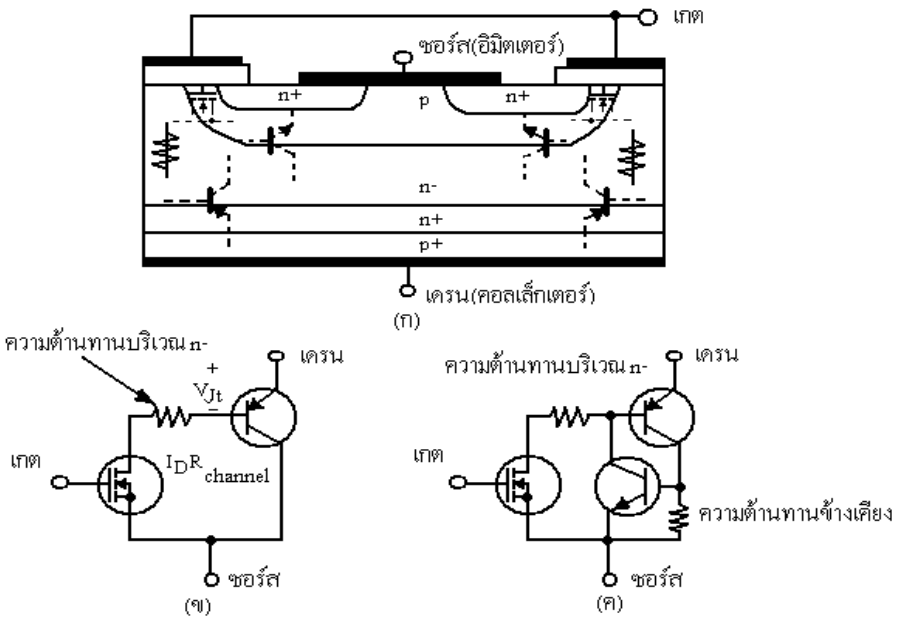
ภาพที่ 2.7 โครงสร้างที่ปรับปรุงเพื่อป้องกันการแลตช์ในไอจีบีที

จะเห็นว่าบริเวณบอดี้p ภายใต้เกตจะโด๊ปด้วยความหนาแน่นในระดับปกติ 1016 cm^3และมีความหนาแน่นน้อยกว่าของบริเวณซอร์ส n+ แต่ส่วนอื่นที่เหลือของบริเวณบอดี้p จะโด๊ปด้วยส่วนความหนาแน่นที่มีมากกว่าคือ 1019 cm^3รวมถึงความหนาก็จะมีมากกว่าด้วยการทำเช่นนี้จะทำให้เพิ่มความสามารถในการนำกระแสให้สูงขึ้นเป็นการช่วยลดความต้านทานข้างเคียงให้น้อยลงด้วย

สำหรับผู้ใช้งานก็สามารถป้องกันการแลตช์ในโหมดสแตติกได้ โดยออกแบบไม่ให้กระแสที่ไหลในโหลดไหลเกินค่ากระแส IDM และป้องกันการแลตช์ในโหมดไดนามิกได้โดยหน่วงเวลาขณะหยุดนำกระแสให้ยาวขึ้น เพื่อให้โฮลที่ยังค้างอยู่ในบริเวณ n- มีเวลาพอที่จะรวมกับอิเล็กตรอนเป็นการลดกระแสที่ไหลผ่าน ค่าความต้านทานข้างเคียงให้น้อยลงเผื่อให้ได้การหน่วง

เวลาขณะหยุดนำกระแสให้ยาวนานขึ้นทำได้โดยการเพิ่มความต้านทานภายนอกอนุกรมเข้ากับขาเกตของไอจีบีที

2.3.5 วงจรสมมูลของไอจีบีที



ภาพที่ 2.8 วงจรสมมูลของไอจีบีที

ก. แสดงโครงสร้างที่มีทรานซิสเตอร์และมอสเฟสฝังอยู่ภายใน

ข. วงจรสมมูลสำหรับการทำงานสภาพปกติของไอจีบีที

ค. วงจรสมมูลที่แสดงส่วนของไทริสเตอร์ที่แฝงอยู่ในไอจีบีที

วงจรสมมูลของไอจีบีทีแสดงไว้ในภาพที่ 2.8 ก. โดยในภาพนั้นจะเห็นว่าในบริเวณบอดี้ p ชั้นบริเวณ n- และชั้นอิงเจ็กติ้ง p+ จะคล้ายกับทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นพีเอ็น โดยแทนได้ด้วยขาคอลเล็กเตอร์ เบสและอิมิตเตอร์ตามลำดับและบริเวณภายใต้เกตก็จะแทนได้ด้วยมอสเฟสซึ่งจะมีความต้านทานบริเวณ n- เชื่อมขาเบสของทรานซิสเตอร์พีเอ็นพีเข้ากับขาเดรนของมอสเฟสซึ่งเมื่อเขียนวงจรสมมูลออกมาจะได้วงจรดังภาพที่ 2.8 ข.

จากภาพที่ 2.8 ข. จะเห็นว่าเป็นวงจรดาร์ลิงตันโดยมีมอสเฟสเป็นตัวขับทรานซิสเตอร์พีเอ็นพีแต่มีจุดพิเศษที่แตกต่างจากวงจรทั่วไปคือกระแสเดรนส่วนใหญ่จะไหลจากอิมิตเตอร์มายังเบสผ่านความต้านทานบริเวณรอยเลื่อนและผ่านขาเดรนของมอสเฟสมาจบลงที่ขาซอร์สจะมีกระแสส่วนน้อยเท่านั้นที่ไหลจากอิมิตเตอร์มายังคอลเล็กเตอร์และขาซอร์สสำหรับวงจรในภาพที่ 2.8 ค. จะแสดงให้เห็นว่าภายในไอจีบีทีจะมีไทริสเตอร์แฝงอยู่ด้วยโดยดูได้จากทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นพี

เอ็นและพีเอ็นพีต่อเข้าด้วยกันในลักษณะที่มีการป้อนกลับ จะเห็นได้ชัดเจนถึงเหตุที่ทำให้เกิดการแลตช์ของไอจีบีทีถ้ากระแสส่วนน้อยที่ไหลผ่านจากอิมิตเตอร์มายังคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์พีเอ็นพีแล้วผ่านความต้านทานข้างเคียงของรอยต่อแล้วนั้นก็จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมความต้านทานสูงกว่า 0.7 โวลต์ทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็นจะนำกระแส ส่งผลให้เกิดการแลตช์ขึ้นใน ไอจีบีทีสำหรับแรงดันตกคร่อมขาเดรนและซอร์สของไอจีบีทีขณะนำกระแส$V_{ds(on)}$สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$V_{ds(on)} = V_{j1} + V_{drift} + \text{IDRchannel} \tag{2.16}$$

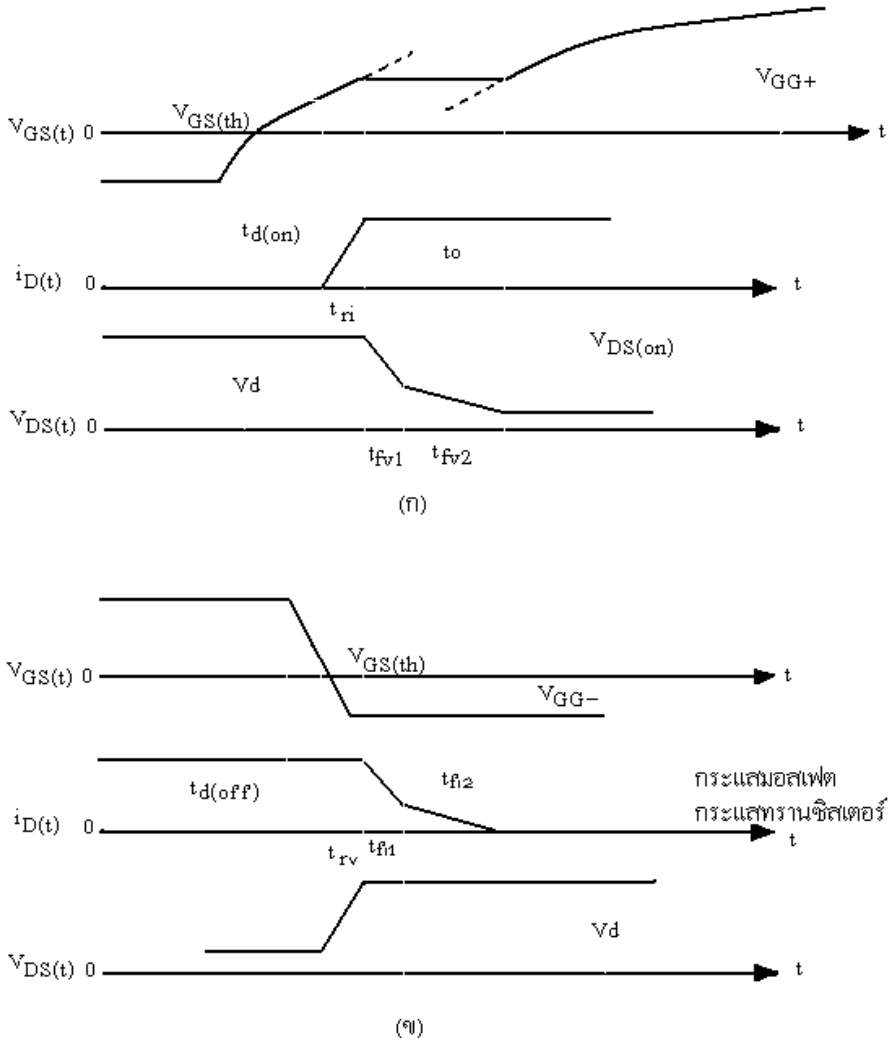
เมื่อ Vj1 เป็นแรงดันไบอัสตรงที่ตกคร่อมรอยต่อพีเอ็น จึงมีค่าค่อนข้างจะคงที่และจะมีการเปลี่ยนแปลงบ้างก็เล็กน้อยเพราะมีความสัมพันธ์โดยตรงในลักษณะเอ็กซ์โปเนนเชียลกับกระแส ทำให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.7-1โวลท์

Vdrift เป็นแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานบริเวณรอยเลื่อนซึ่งความต้านทานนี้มีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อเปรียบเทียบกับค่าแรงดันในมอสเฟสแล้วจะมีค่าน้อยกว่าเพราะผลของการมอดูเลตสภาพนำที่เกิดขึ้นในไอจีบีที Rchannel เป็นค่าความต้านทานในย่าน 1- 1,000 โอห์ม มีค่าค่อนข้างคงที่ IDRchannel เป็นแรงดันตกคร่อมมอสเฟส

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า $V_{ds(on)}$ จะมีค่าสูงมากขึ้นตามค่ากระแสเดรนที่สูงขึ้นโดยทั่วไปไอจีบีทีจะสามารถทำงานได้ในอุณหภูมิรอยต่อสูงสุดถึง 150 องศาเซลเซียลและผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากค่าอุณหภูมิห้องไปถึงค่าสูงสุดนี้ก็จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่า$V_{ds(on)}$เพียงเล็กน้อยเท่านั้น เพราะไอจีบีทีมีค่า $V_{ds(on)}$เป็นผลรวมระหว่างแรงดันตกคร่อมมอสเฟสที่มีสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิเป็นบวกอุณหภูมิสูงขึ้นแรงดันตกคร่อมความต้านทานบริเวณลอยเลื่อนจะสูงขึ้นตามกับแรงดันตกคร่อมความต้านทานบริเวณรอยเลื่อนที่มีสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ

2.3.6 ลักษณะการสวิตช์

ลักษณะของสัญญาณกระแสและแรงดันในช่วงเวลาที่เกิดการนำกระแสและหยุดนำกระแสแสดงไว้ในภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 ลักษณะของสัญญาณกระแสและแรงดัน

ก. ลักษณะของกระแสและแรงดันขณะนำกระแส

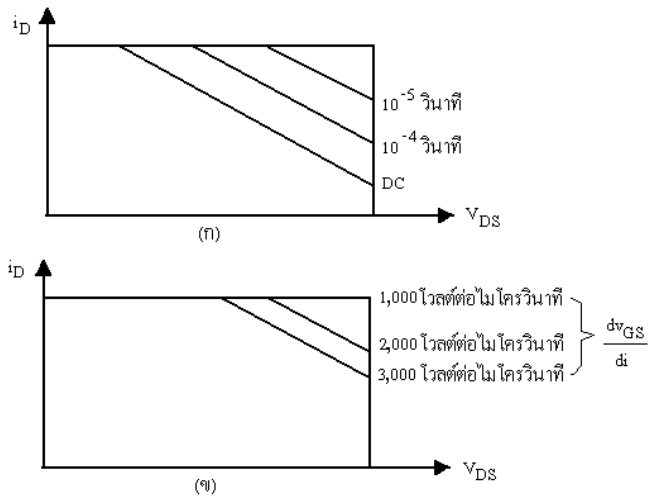
ข. ลักษณะของกระแสและแรงดันขณะหยุดนำกระแส

โดยช่วงเวลาในการนำกระแสของไอจีบีทีจะแสดงไว้ในภาพที่ 2.9 ก. ซึ่งจะมีลักษณะของการนำกระแสจะคล้ายกับการนำกระแสของมอสเฟสคือจะมีเวลาก่อนการนำกระแส (td(on)) จะนับตั้งแต่เวลาที่แรงดันระหว่างเกตกับซอร์สอยู่ในช่วง VGG- จนถึง VGS(th) ความจริงแล้วการป้อนแรงดันนี้จะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดจากค่า VGG- เป็น VGG+ แต่มีลักษณะเป็น

เอ็กซ์โปเนนเชียล เหตุที่เป็นเช่นนั้นคือเนื่องมาจากผลการชาร์จประจุของตัวเก็บประจุระหว่างขาเกตและขาซอร์สและเกทกับเดรนภายในไอจีบีทีแรงดันที่ขาเดรนจะยังคงที่ในช่วงเวลาขาขึ้น (tri) หรือในช่วงเวลาที่กระแสเดรนยังไม่ถึงค่ากระแสทำงานนี้ (Io) หลังจากกระแสเดรนก็จะคงที่แต่แรงดันจะตกลงสู่ค่า VSD(on) โดยจะแบ่งช่วงเวลาลงเป็นสองช่วง คือช่วง tfv1 เป็นช่วงที่ทำงานอยู่ในย่านความต้านทานสูงๆส่วน tfv2 ช่วงที่ทำงานอยู่ในช่วงความต้านทานต่ำ ในภาพที่ 2.9 ข. จะเป็นภาพแสดงลักษณะกระแสและแรงดันในช่วงเวลาที่ไอจีบีทีหยุดนำกระแสจะเห็นได้ว่ากระแสเดรนยังคงที่อยู่ตลอดช่วงเวลาที่แรงดันที่ขาเดรนเพิ่มขึ้นและมีช่วงเวลาลงของกระแสที่ขาเดรนที่แตกต่างชัดเจนสองช่วงโดยช่วงแรก tfi1 จะเป็นช่วงหยุดนำกระแสของมอสเฟสภายในไอจีบีทีแต่และช่วง tfi2 จะเป็นช่วงหยุดนำกระแสของทรานซิสเตอร์พีเอ็นพีซึ่งจะช้ากว่ามอสเฟสทำให้ช่วงเวลานี้นานกว่าช่วงแรกและมีการสูญเสียกำลังงานมากในช่วงนี้

2.3.7 พื้นที่การทำงานที่ปลอดภัย

ในขณะไบอัสตรงที่กว้างมาก เกือบได้เป็นสี่เหลี่ยมสำหรับเวลาในการสวิตช์ที่สั้นๆนั้นแต่จะแคบลงเมื่อเวลาในการสวิตช์ยาวนานขึ้น ซึ่งถ้าเทียบกับเพาเวอร์มอสเฟสแล้วไอจีบีทีจะทำงานได้ในช่วงพื้นที่ที่กว้างกว่าเมื่อเวลาในการสวิตช์เท่ากันไอจีบีทีมีพื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยทั้งในระหว่างนำกระแสและหยุดนำกระแสโดยมีพื้นที่การทำงานที่ปลอดภัย



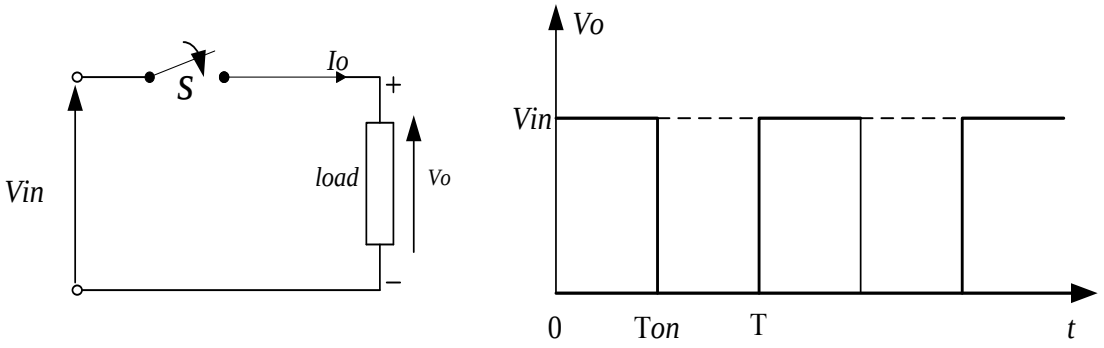
ภาพที่ 2.10 พื้นที่การทำงานของไอจีบีที

ก. พื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยในสภาวะไบอัสตรง

ข. พื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยในสภาวะไบอัสกลับ

ในช่วงระยะเริ่มนำกระแสและขณะที่นำกระแสแล้วจุดการทำงานของ ไอจีบีทีก็จะต้องมีขนาดแรงดันและกระแสที่ขาเดรนอยู่ภายในพื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยในช่วงไบอัสตรงเสมอ ดังภาพที่ 2.10 ก. หากไม่เช่นนั้นแล้วจะทำให้เกิดการเสียหายเกิดขึ้นกับไอจีบีทีจากรูปพื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยของไอจีบีทีนี้แสดงถึงขีดจำกัดของกระแสเดรน , อัตราทนแรงดันไหลตรงและอุณหภูมิรอยต่อของ ไอจีบีทีตามลำดับสำหรับการทำงานที่ปลอดภัยในช่วงของการไบอัสกลับ จะแตกต่างจากในช่วงไบอัสตรงโดยในรูปนี้จะแสดงค่าจำกัดของค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ขาเดรนต่อเวลา (dvDS/dt) ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่วงระหว่างหยุดนำกระแสแทนขีดจำกัดทางด้านอุณหภูมิที่รอยต่อ และ จะมีพื้นที่แคบลงถ้า (dvDS/dt) มีค่าสูงมากขึ้นส่วนเหตุผลที่ถูกจำกัดโดยค่านี้เพราะไม่ต้องการให้เกิดการแลตช์ขึ้นที่ไอจีบีทีค่า (dvDS/dt) นี้จะมีผลโดยตรงกับช่วงเวลาหยุดนำกระแสของไอจีบีที หมายความว่าถ้ามีอัตราการเปลี่ยนแปลงเร็วจะทำให้ช่วงเวลาหยุดนำกระแสน้อยแต่ก็ยังถือว่าโชคดีที่ขีดจำกัด dvDS/dt ของไอจีบีทีมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ไทริสเตอร์ตัวอื่นๆดังนั้นความจำเป็นในการใช้วงจรสนับเบอร์เพื่อป้องกันการแลตช์ก็ไม่มีความจำเป็นต้องใช้และการควบคุมค่า dvDS/d ที่เกิดขึ้นยังทำได้ง่ายขึ้นด้วยการออกแบบวงจรขับเกตที่มีค่าความต้านทานที่ต่อกับขาเกตและค่า VGG-ที่เหมาะสม

2.3.8 DC-DC CONVERTER [2]



ภาพที่ 2.11 หลักการของ DC-DC Chopper

ดีซีชอปเปอร์เป็นวงจรที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าดีซีจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีค่าคงที่ให้ได้แรงดันเอาท์พุทดีซีที่สามารถปรับค่าได้ตามต้องการ โดยใช้หลักการ ON และ OFF อิเล็กทรอนิกส์สวิตซ์ หรือ ดีซีชอปเปอร์โดยทั่วไปจะนำไปใช้ในงานต่อไปนี้รถยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่กระแสตรงและภายในโครงงานนี้ได้นำมาใช้ในการขับเครื่องรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าด้วยพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่กระแสตรงเช่นเดียวกัน Regulator ประสิทธิภาพสูง เป็นต้น การ ON และ OFF อิเล็กทรอนิกส์ สวิตซ์มีวิธีการ 2 แบบคือ

1. แบบ Constant – Freqency เป็นวงจรชอปเปอร์ที่ควบคุมให้ Time Period (T) คงที่ แล้วปรับเวลา ON Time (T_{on}) การควบคุมในลักษณะนี้เรียกว่าPulse - Width – Modulation (PWM)

2. แบบ Variable – Frequency เป็นวงจรชอปเปอร์ที่ปรับ Time Period โดยการปรับ ON Time หรือ OFF Time ($T - T_{on}$) การควบคุมแบบนี้เรียกว่า Frequency – Modulation แต่เนื่องจากการควบคุมในลักษณะนี้ความถี่มีการเปลี่ยนแปลงในย่านกว้างทำให้ยากในการ Filter

2.3.9 อิเล็กทรอนิกส์สวิตซ์ที่ใช้ในวงจรมีอยู่2 แบบคือ

1. แบบที่ทำให้กระแสหยุดไหลด้วยการบีบบังคับ(Forced Commutation) คือ เอสซีอาร์จะนำมาใช้งานในความถี่ต่ำ

2. แบบที่ทำให้กระแสไหลได้ด้วยตัวเอง (Self Commutation) คือเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ มอสเฟส จีทีโอ และ ไอจีบีทีจะนำมาใช้ในงานความถี่สูง

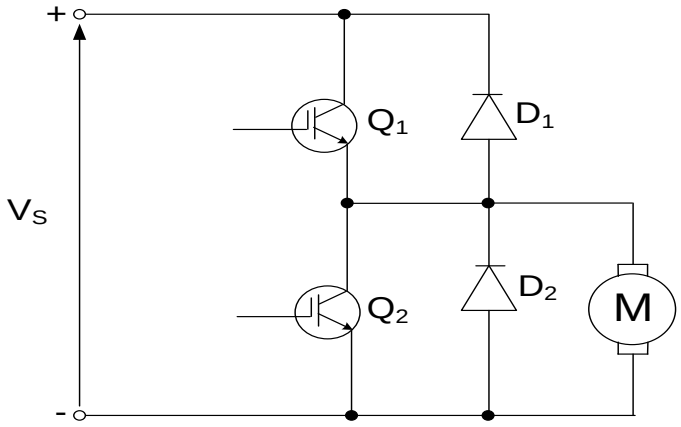
2.4 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยชอปเปอร์ใน 2 ควอตแดนซ์ [3]

มอเตอร์แบบ Regenerative ทิศทางของแรงดันเป็นบวก แต่ทิศทางของกระแสจะกลับเป็นทิศทางจากเดิมทิศทางกระแสเป็นลบ ในสภาวะนี้ มอเตอร์จะเปลี่ยนสภาวะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กำลังงานของมอเตอร์จะไหลย้อนกลับไปที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าและถูกลัดวงจรกระแสตรงโดยใช้ไอจีบีทีแรงบิดมีทิศทางสวนทางกลับทางเดิมทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์จะลดลงอย่ารวดเร็ว

2.4.1 วงจรชอปเปอร์แบบ 2 ควอตแดนซ์

การควบคุมวงจรชอปเปอร์จะทำงานในควอตแดนซ์ที่ 1 เมื่อแรงดันอาร์เมเจอร์และกระแสอาร์เมเจอร์เป็นบวกในการเบรกนั้นวงจรชอปเปอร์จะทำงานในควอตแดนซ์ที่ 2 แสดงในภาพที่ 2.13 กำลังเป็นที่นิยมใช้กันมากในการเบรกมอเตอร์ วงจรไอจีบีทีแบบ 2 ควอตแดนซ์จะแสดงในภาพที่ 2.14

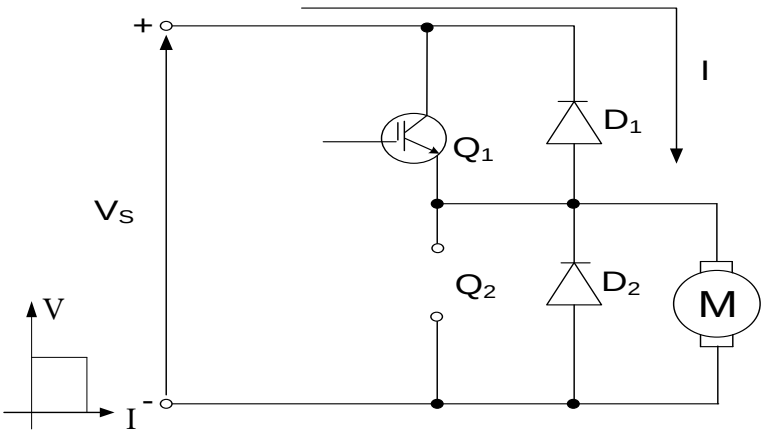
การควบคุมกำลังไอจีบีที Q_1 และ ไดโอด D_2 จะทำงานเมื่อ Q_1 ทำงาน แรงดันแหล่งจ่าย V_S จะไหลไปที่มอเตอร์ เมื่อ Q_1ไม่ทำงานกระแสในอาร์เมเจอร์จะไหลวนเวียนผ่านไดโอด D_2



ภาพที่ 2.12 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์แบบ 2 ควอตแดนซ์

ภาพแสดงวงจรการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบ 2 ควอตแดนซ์และการควบคุมกำลังไอจีบีที Q_1 และ ไดโอด D_2 จะทำงานเมื่อ Q_1 ทำงาน แรงดันแหล่งจ่าย V_S จะไหลไปที่มอเตอร์ เมื่อ Q_1ไม่ทำงานกระแสในอาร์เมเจอร์จะไหลวนเวียนผ่านไดโอด D_2

2.4.2 การควบคุมการเดินหน้าของมอเตอร์



ภาพที่ 2.13 ภาพแสดงการเดินหน้าของมอเตอร์

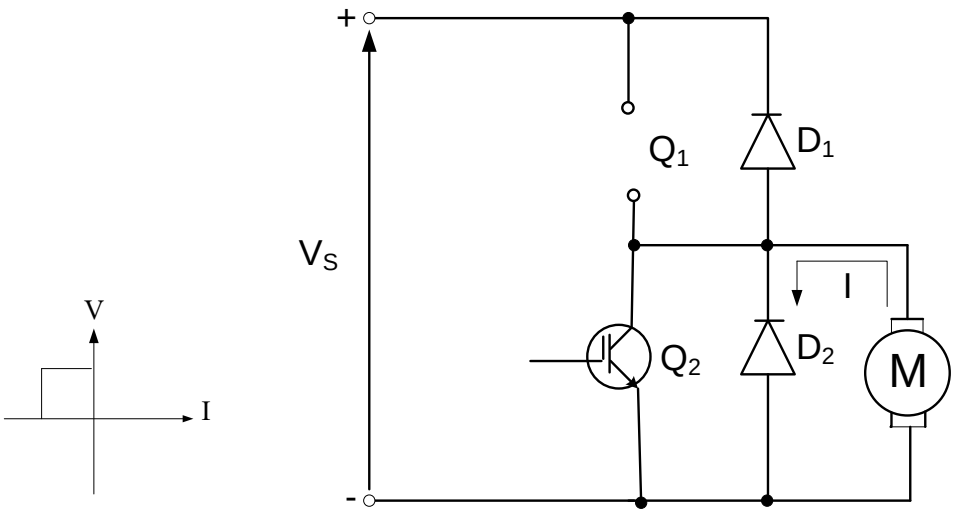
การควบคุมการเดินหน้าของมอเตอร์ ไอจีบีที Q_1 จะทำงาน Q_2 จะหยุดทำงาน เมื่อ D_1 ทำงานแรงดันจากแหล่งจ่ายจะปรากฏที่จุดต่อของมอเตอร์และกระแสอาร์เมเจอร์จะเพิ่มขึ้นเมื่อ Q_1 หยุดทำงาน Q_2 จะทำงาน คือการทำงานในควอตแดนซ์ที่ 2 คือการเบรก

สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเฉลี่ยของการเดินหน้า

$$V_a = kV_s \tag{2.17}$$

โดยที่ k = DutyCycle

V_s = แรงดันที่แหล่งจ่าย



ภาพที่ 2.14 ภาพแสดงการเบรกของมอเตอร์

การเบรคแบบ Regenerativeไอจีบีที Q_2 และไดโอ D_1 จะทำงานเมื่อ Q_2 ทำงานมอเตอร์จะเปรียบเสมือนเครื่องกำเนิดและกระแสอาร์เมเจอร์จะเพิ่มขึ้นคืนพลังงานให้กับแหล่งจ่าย โดยกระแสจะไหลผ่านไดโอด D_1 ในอุตสาหกรรมทั่วไปจะนิยมใช้ 4 ควอตแดนซ์ดังแสดงในภาพที่ 2.14

สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเฉลี่ยของการเบรกมอเตอร์

$$V_{CH} = (1-k)V_s \tag{2.18}$$

$$P = I_a V_{CH} = I_a V_{CH}(1-k) \tag{2.19}$$

$$E_g = K_v I_a \omega \tag{2.20}$$

$$= V_{CH} + R_a I_a = (1-k)V_s - R_a I_a \tag{2.21}$$

บทที่ 3

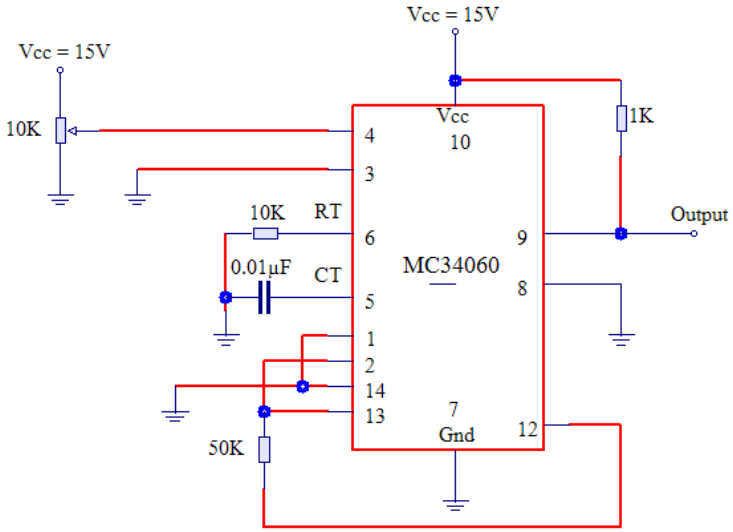
การออกแบบโครงงาน

3.1 การออกแบบโครงงาน

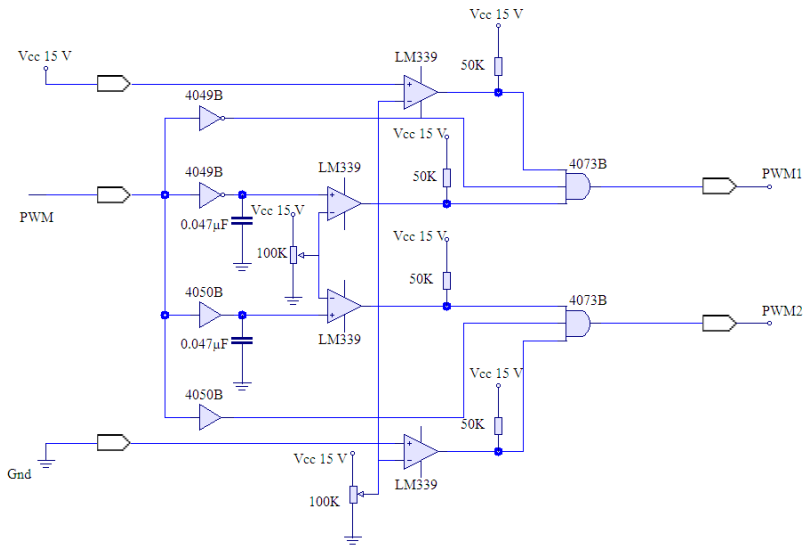
การออกแบบโครงงานการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 2 ควอตแดนซ์แบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

- วงจรกำเนิดสัญญาณพี.ดับเบิ้ลยู.เอ็ม. (P.W.M.)
- วงจรการเลื่อนเฟส (Phase shift)
- วงจรขับเกตไอจีบีที (Gate driver circuit)

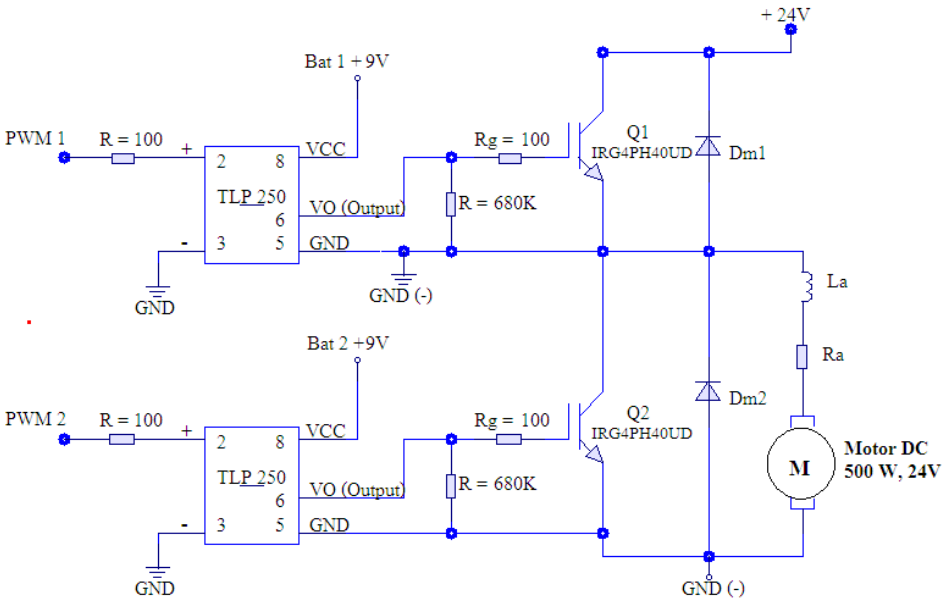
3.2 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 2 ควอตแดนซ์



ภาพที่ 3.1 แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณพี.ดับเบิ้ลยู.เอ็ม. (P.W.M.)



ภาพที่ 3.2 แสดงวงจรเลื่อนเฟส (Phase Shift)



ภาพที่ 3.3 แสดงวงจรขับเกตไอจีบีที (Gate Driver Circuit) โดยใช้ไอซี TLP250

หลักการทำงานของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์แบบ 2 ควอตแดนซ์จะประกอบไปด้วยวงจรหลักสามวงจรคือ วงจรกำเนิดสัญญาณ พี.ดับเบิ้ลยู.เอ็ม.คือ สัญญาณสี่เหลี่ยมที่สามารถปรับความกว้างของสัญญาณเพื่อใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ วงจรเลื่อนเฟสมีหน้าที่ในการปรับขอบขาขึ้นของสัญญาณพัลส์ให้มีการหน่วงเวลาในการเกิดของแต่ละควอตแดนซ์เพื่อป้องกันการชนกันของสัญญาณพัลส์ในแต่ละควอตแดนซ์ อาจทำให้เกิดความเสียหายกับไอจีบีที วงจรไดร์มอเตอร์จะประกอบด้วยอุปกรณ์สำคัญคือไอซีเบอร์ TLP250 ทำหน้าที่ในการขยายสัญญาณ พี.ดับเบิ้ลยู.เอ็ม.(P.W.M.) เพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานของไอจีบีที (IGBT) (Insulated - Gate Bipolar Transistor) ในที่นี้ใช้เบอร์ IRG4PH40UD 1200V จะเห็นว่าเพิ่ม Fast Diode เป็นอุปกรณ์ในการคืนพลังงานกลับ Revcovery ในแต่ละตัวของ State ของตัวไอจีบีที

3.3 การออกแบบวงจรการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง [4]

จากหลักการพื้นฐานของวงจร ชอปเปอร์ดังที่กล่าวมาแล้วนั้น จะนำมาสร้างชุดขับเคลื่อนมอเตอร์โดยในที่นี้เราจะเลือกการขับเคลื่อนแบบ 2 ควอตแดนซ์ที่แสดงในหัวข้อที่ผ่านมา โดยมีจุดประสงค์ให้มอเตอร์เคลื่อนที่ในทิศทางเดียวการควบคุมแรงดันเฉลี่ยในวงจรอาร์เมเจอร์จะใช้วิธี พี.ดับเบิ้ลยู.เอ็ม. (P.W.M.) พิกัดของขนาดมอเตอร์ที่ต้องการขับเคลื่อนที่มี ขนาดไม่เกิน 500 วัตต์ แรงดัน 24 โวลต์โดยโครงสร้างชุดขับเคลื่อนมอเตอร์แบบ 2 ควอตแดนซ์ จะมีรายละเอียดดังนี้

3.4 การสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณพี.ดับเบิ้ลยู.เอ็ม. (P.W.M.) [5] [6]

วงจรกำเนิดสัญญาณ พี.ดับเบิ้ลยู.เอ็ม. (P.W.M.) นี้จะเลือกใช้ไอซีเบอร์ MC34060A นี้ซึ่งมีวงจรกำเนิดสัญญาณฟันเลื่อยและวงจรเปรียบเทียบอยู่ภายใน การกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการกำเนิดความถี่กำหนดได้ดังนี้

f_{osc} เท่ากับ ความถี่ของสัญญาณพัลส์

R_T,C_T เท่ากับ ค่าพารามิเตอร์ของวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์

$$R_T = \frac{1.2}{R_T C_T} \tag{3.1}$$

3.4.1 การคำนวณหาค่า C_T และ R_T

วงจรกำเนิดสัญญาณสัญญาณ พี.ดับเบิ้ลยู.เอ็ม. (P.W.M.) นี้ ได้เลือกใช้ความถี่ที่ 10 กิโลเฮิร์ท เหตุผลในการเลือกความถี่ในย่านนี้ เพื่อต้องการให้กระแสของมอเตอร์มีริปเปิ้ลน้อยลง เราสามารถเลือกย่านความถี่ให้มีค่ามากกว่านี้ แต่ผลที่ตามมาจะมีสัญญาณรบกวนมาก จากคู่มือของ MC 34060A จะหาค่าของ C_T และ ความต้านทาน R_T จากสมการ $f_{osc} = \frac{1.2}{R_T C_T}$

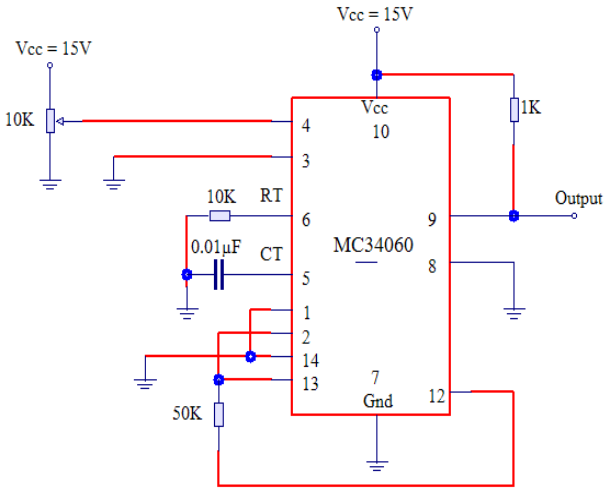
คำนวณหาค่า R จากสูตร

$$RT = \frac{1.2}{R_T C_T} \tag{3.2}$$

พิจารณา $C_T = 0.01$ ไมโครฟารัด

พิจารณา $f_{osc} = 10$ กิโลเฮิร์ท

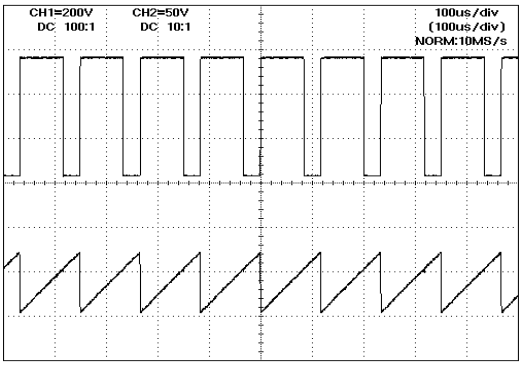
$R_T = \frac{1.2}{10\times10^{3}\times0.01\times10^{-6}} = 12$ กิโลโอห์ม



ภาพที่ 3.4 แสดงวงจรการสร้างสัญญาณ พี.ดับเบิ้ลยู.เอ็ม. (P.W.M.) โดยใช้ IC MC34060A

แสดงภาพวงจรการสร้างสัญญาณ พี.ดับเบิ้ลยู.เอ็ม. (P.W.M.) โดยใช้ ไอซีเบอร์MC34060A ค่าความกว้างของสัญญาณเอาท์พุท จะถูกควบคุมจากระดับแรงดันไฟฟากระแสตรง ที่ป้อนเข้าทางอินพุทที่ขา 4 ในช่วงระดับแรงดัน 0-15 โวลต์ ค่าความถี่ของสัญญาณเอาท์พุทจะถูกกำหนดที่ค่า C_T และ R_T ตามภาพที่ 3.4

3.4.2 สัญญาณ Pulse Width Modulation (P.W.M.) [5] [6]



ภาพที่ 3.5 แสดงรูปคลื่นสัญญาณเอาท์พุทของ Pulse Width Modulation (P.W.M.)

เป็นตัวกำเนิดสัญญาณความถี่และควบคุมความกว้างของสัญญาณ ตามค่าคำสั่งที่ผ่านให้วงจร กำหนดให้คำสั่งเท่ากับค่า V_S ซึ่งเป็นระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงนั้น เมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปฟันเลื่อยที่ที่ถูกสร้างขึ้นภายในวงจร พี.ดับเบิ้ลยู.เอ็ม. หน้าที่สำคัญของวงจรพี.ดับเบิ้ลยู.เอ็ม.คือสร้างสัญญาณรูปฟันเลื่อยและเปรียบเทียบสัญญาณฟันเลื่อยกับระดับแรงดัน V_S จากภาพที่ 3.5 นี้แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบสัญญาณทั้งสองได้สัญญาณเอาท์พุทเป็นภาพพัลส์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าดิวตี้ไซเคิลตามผลการเปรียบเทียบสัญญาณเอาท์พุทนี้ จะนำไปผ่านวงจรขับเกตของไอจีบีที เพื่อควบคุมการเปิด-ปิดต่อไป ส่วนสัญญาณ Dead Time Control ที่เห็นในรูปเป็นสัญญาณอินพุทอีกขาหนึ่ง MC34060Aมีไว้ใช้ในกรณีที่ต้องการควบคุม Dead Time โดยคุณสมบัติเดียวกับขา V_S

3.4.3 การกำหนดย่านความถี่ของวงจร พี.ดับเบิ้ลยู.เอ็ม. (P.W.M.)

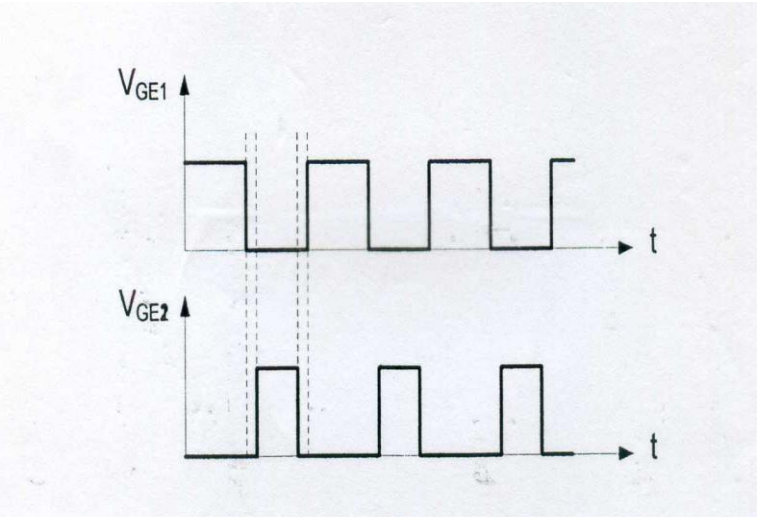
หลักเกณฑ์ในการกำหนดขนาดความถี่ให้วงจรชอปเปอร์ มีดังนี้

- คุณสมบัติของไอจีบีทีที่นำมาใช้ในการเปิด-ปิดวงจรในที่นี้เลือกใช้ ไอจีบีที ของบริษัท International Rectifier(IR) เบอร์ IRG4PH40UDอัตราทนแรงดันสูงสุดจะเท่ากับ 1200 โวลท์ การตอบสนองความถี่ 1-10 กิโลเฮิร์ท อัตราทนกระแสต่อเนื่องที่คอลเลคเตอร์ 41 แอมแปร์ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

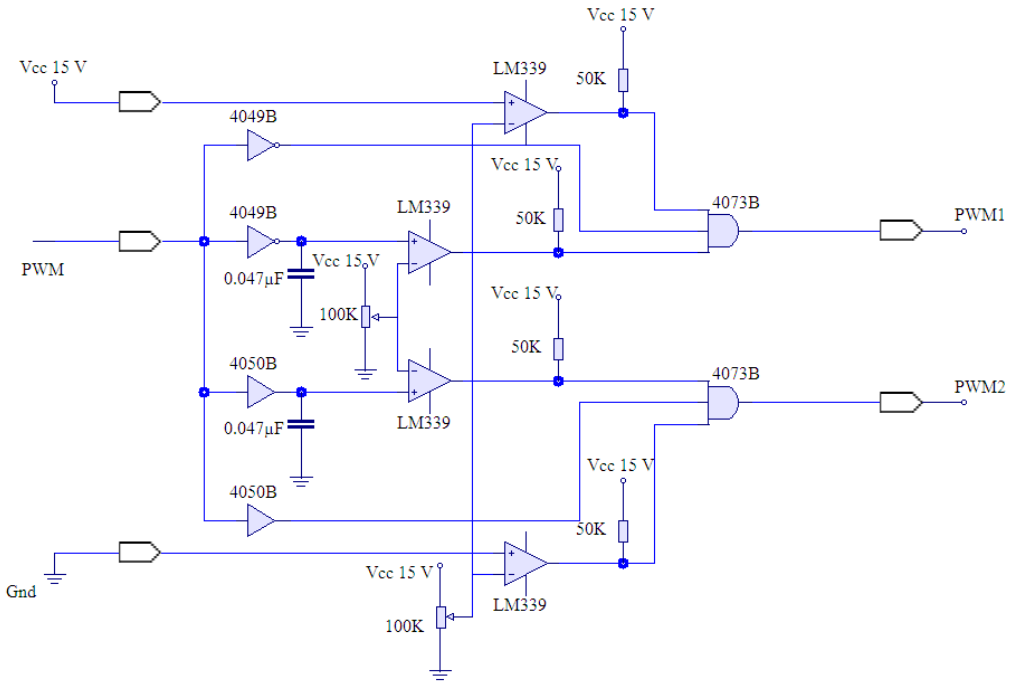
- ความต่อเนื่องของกระแสอาร์เมเจอร์ ในขณะที่มีการเปิด-ปิด ถ้าความถี่ของการเปิด-ปิดน้อยเกินไปจะเกิดความไม่ต่อเนื่องของกระแสทำให้มีผลกับค่าแรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้น

3.5 วงจรเลื่อนเฟส (Phase Shift)

เนื่องจากการออกแบบการขับเคลื่อนมอเตอร์ในที่นี้เป็นแบบ 2 ควอตแดนซ์ โดยกำหนดให้ไอจีบีทีทั้งสองตัวทำงานสลับกันเฟสของสัญญาณควบคุมไอจีบีทีทั้งสองจะห่างกัน 180 องศาหรือทำงานสลับกันแต่ปัญหาในการเปิด-ปิดไอจีบีทีแต่ละตัวจะมีโอกาสที่จะทำงานพร้อมกันได้ชั่วขณะจะทำให้เกิดการลัดวงจรได้ ดังนั้นจึงได้ใช้วงจรเลื่อนเฟสของสัญญาณทั้งสองให้มีการหน่วงเวลาเพื่อป้องกันการลัดวงจรจากภาพที่ 3.6 แสดงให้เห็นถึงสัญญาณควบคุมไอจีบีทีทั้งสองตัวหลังจากได้ผ่านวงจรเลื่อนเฟสจะเห็นได้ว่าจะมีช่องว่างเล็กน้อยก่อนที่ ไอจีบีทีแต่ละตัวจะทำงานตามภาพที่ 3.7 แสดงวงจรเลื่อนเฟสโดยประยุกต์จาก IC.OP-AMP และ IC.CMOS สร้างวงจรเลื่อนเฟส



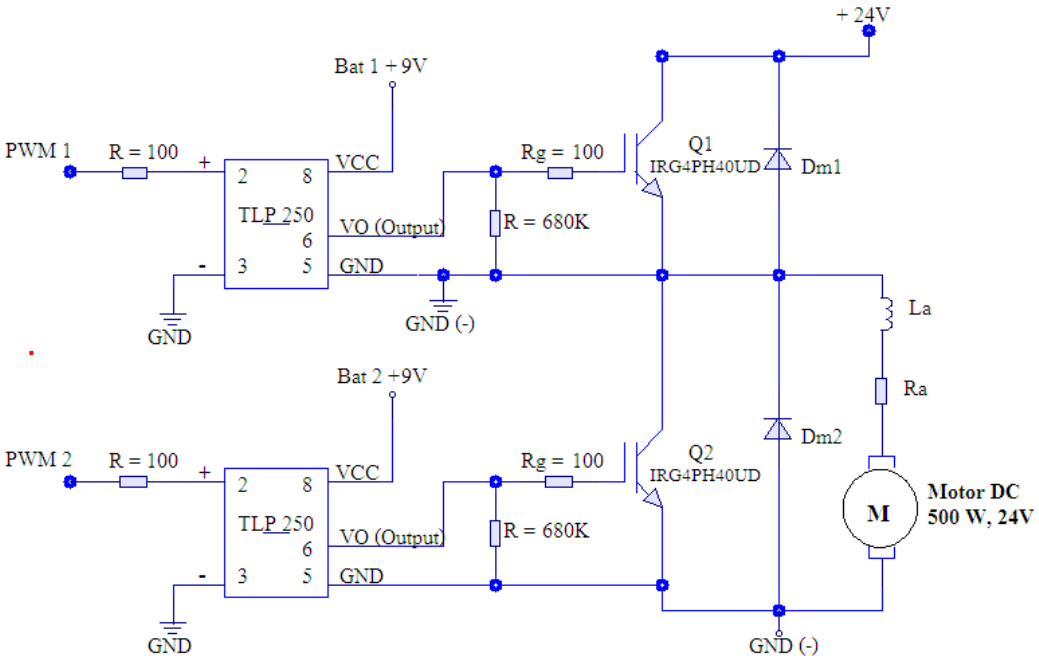
ภาพที่ 3.6 แสดงรูปสัญญาณที่ผ่านการเลื่อนเฟส



ภาพที่ 3.7 แสดงวงจรเลื่อนเฟส

3.6 วงจรขับเกตไอจีบีที (Gate Driver Circuit)

เป็นวงจรที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณ พี. ดับเบิ้ลยู. เอ็ม. (P.W.M.) ในโครงงานนี้จะเลือกใช้ไอซีสำเร็จรูป TLP250 เพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานของไอจีบีที (IGBT) (Insulated - Gate Bipolar Transistor) ในที่นี้ใช้เบอร์ IRG4PH40UD 1200V จะเห็นว่าเพิ่ม Fast Diode เป็นอุปกรณ์ในการคืนพลังงานกลับ Revcovery ในแต่ละตัวของ State ของตัวไอจีบีที



ภาพที่ 3.8 แสดงวงจรขับเกตไอจีบีที แบบ 2 ควอตแดนซ์ โดยใช้ไอซี TLP250

แสดงการใช้ไอซี TLP250 ขับขาเกตแบบ 2 ควอตแดนซ์ โดยจะมีขาอินพุท2 ขา คือ PWM1 และ PWM2 ซึ่งรับสัญญาณจากไอซีMC34060A สร้างสัญญาณพี.ดับเบิ้ลยู.เอ็ม (P.W.M.) ที่ผ่านวงจรเลื่อนเฟสแล้ว ตามวงจรที่แสดงในภาพที่ 3.8 นี้เป็นวงจรที่ผลิตได้แนะนำในคู่มือการใช้ไอซี

3.7 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า

การที่รถจักรยานยนต์ไฟฟ้านั้นเคลื่อนที่ได้นั้นต้องอาศัยกำลังของมอเตอร์ ที่ส่งผ่านระบบส่งกำลังมาที่ล้อเพื่อใช้ในการขับเคลื่อน ขณะที่รถไฟฟ้าเคลื่อนที่นั้นจะมีแรงต้านการเคลื่อนที่โดยจะมีทิศทางที่สวนทางกับแรงขับเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่เช่น 40 กิโลเมตร/ชั่วโมง เราสามารถที่จะหาค่าแรงขับเคลื่อนได้โดยอาศัยกฎข้อที่ 1 ของนิวตันจะได้ว่า

แรงขับเคลื่อน=แรงต้านทั้งหมด (3.3)

โดยที่ถ้าแรงในการขับเคลื่อนมากกว่าแรงต้านทั้งหมดรถไฟฟ้าจะมีอัตราเร็วมากขึ้น อาจทำได้โดยการกดปุ่มบังคับการเร่งเพื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์จะทำให้แรงขับเคลื่อนที่ล้อมากขึ้น และถ้าแรงขับเคลื่อนน้อยกว่าแรงต้านทั้งหมดรถไฟฟ้าจะมีอัตราเร็วที่ลดลงในขณะที่

อัตราเร็วลดลงนั้น แรงต้านทั้งหมดจะลดลงด้วยจนในที่สุดจนแรงขับเคลื่อนจะเท่ากับแรงต้านทั้งหมดของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าจะวิ่งด้วยอัตราเร็วคงที่ต่อไป ซึ่งแรงต้านเหล่านั้นได้แก่

แรงต้านการหมุนล้อ (Rolling Resistance)

แรงต้านอากาศ (Air Resistance)

แรงต้านทางชัน (Gradient Resistance)

นอกจากนั้นในขณะเร่งมอเตอร์ กำลังบางส่วนต้องสูญเสียไปเพื่อเอาชนะความเฉื่อยของรถไฟฟ้าเรียกว่า แรงต้านเฉื่อย (Inertia Resistance)

3.8 แรงต้านการหมุนของล้อ

กำลังจากมอเตอร์ที่ล้อขับเคลื่อน จะถูกใช้ไปเพื่อเอาชนะแรงต้านการหมุนของล้อ การหาแรงต้านการหมุนของล้ออาจทำได้โดยการออกแรงดันรถไฟฟ้าให้เคลื่อนที่ไปด้วยอัตราเร็วคงที่ค่าหนึ่งแรงที่ใช้ในการดันรถไฟฟ้าจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสิ่งต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพถนน และค่าสัมประสิทธิ์ (Kr)

สภาพถนน	**ค่าสัมประสิทธิ์(K_r)**
สภาพดี	0.01-0.016
ถนนเป็นกรวด	0.015-0.020
ถนนไม้อัดกันเรียบ	0.020-0.030
ถนนเป็นหิน	0.016-0.07
ถนนเป็นทราย	0.15-0.3

3.9 แรงต้านทางอากาศ

กำลังจากมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนที่ล้อส่วนมากต้องใช้ไปเพื่อเอาชนะแรงต้านอากาศโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อัตราเร็วสูงๆ แรงต้านอากาศจะเกิดขึ้นเมื่อรถจักรยานยนต์ไฟฟ้ามีการเคลื่อนที่และจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับรูปทรง อัตราพื้นที่หน้าตัดของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า

สูตรที่ใช้ในการคำนวณเพื่อหาแรงต้านอากาศ

$$Ra = Ka.A.V^2 \qquad (3.4)$$

เมื่อ Ra = แรงต้านอากาศ,

Ka = สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (0.031)

A = ที่หน้าตัดของรถไฟฟ้า,m^2

V = อัตราเร็วรถไฟฟ้า,km/h

เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้านั้นไม่เป็นสี่เหลี่ยม คือ มีส่วนเว้าโค้งตามความสวยงามของรถการออกแบบจึงทำให้ไม่สามารถหาพื้นที่หน้าตัดของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องดังนั้นจึงทำได้โดยวิธีประมาณ

$$A = 0.78Ba.Ha \quad (3.5)$$

เมื่อ A = พื้นที่หน้าตัดรถไฟฟ้า,m^2

Ba = ความกว้างของรถไฟฟ้า,m

Ha = ความสูงของรถไฟฟ้า,m

3.10 แรงต้านทานทางชัน

ในขณะที่รถจักรยานยนต์ไฟฟ้าวิ่งขึ้นทางชัน กำลังของมอเตอร์บางส่วนต้องถูกใช้ไปเพื่อเอาชนะแรงต้านทางชัน ทำให้มอเตอร์ต้องทำงานหนักมากขึ้นกว่าวิ่งบนทางระดับ แต่ในทางกลับกับรถไฟฟ้าวิ่งในทางลาดมอเตอร์ จะทำงานเบาขึ้นเพราะมีแรงเสริม เนื่องจากน้ำหนักรถไฟฟ้าทำให้รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ได้เอง

แรงต้านทางชันเกิดมากน้อยขึ้นอยู่กับ

1 น้ำหนักของรถไฟฟ้า

2 ความชันของถนน

สามารถหาแรงต้านทางชันสูตร

$$Rg = W \sin\theta \quad (3.6)$$

เมื่อ Rg = แรงต้านทางชัน,N

W = น้ำหนักของรถไฟฟ้า,N

$\sin\theta$ = ความชัน

3.11 แรงต้านรวม

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงแรงต้านรวมคือแรงต้านในการขับเคลื่อนและถ้าแรงขับเคลื่อนน้อยกว่าแรงต้านทั้งหมดรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าจะไม่สามารถขับเคลื่อนได้

$$Rt = Rr + Ra + Rg \text{ (กรณีคิดรวมแรงต้านทางชัน)} \quad (3.7)$$

$$Rt = Rr + Ra \text{ (กรณีทางเรียบ)} \quad (3.8)$$

3.12 กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อน

คำนวณหากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อน เพื่อให้ได้ความเร็วที่ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ตามความต้องการเนื่องจากรถวิ่งด้วยอัตราเร่งคงที่

โดยแรงขับเคลื่อนที่ล้อ F = หาได้จาก Rt

กำลังขับเคลื่อนที่ล้อหาได้จาก

$$Pw = \frac{FV}{3.6} \tag{3.9}$$

โดยที่ Pw = กำลังเคลื่อนที่ล้อW

F = แรงขับเคลื่อน N

V = ความเร็วที่ใช้ km/h

3.13 ทอร์คและกำลังที่ส่งได้

ในการสร้างรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าต้องคำนึงถึงทอร์คของมอเตอร์เพื่อให้สามารถรับโหลดตามการออกแบบรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า

$$Te = \frac{60\ Pm}{2\pi N} \tag{3.10}$$

โดยที่ Tm = ทอร์ค

Pm = กำลังของมอเตอร์

N = จำนวนรอบต่อวินาที

3.14 คำนวณหาขนาดแบตเตอรี่ที่ใช้

รถจักรยานยนต์ไฟฟ้าต้องใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ในการขับเคลื่อนจึงต้องคำนวณให้ได้ค่ากระแสที่มอเตอร์ต้องการเพื่อประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ที่สมบูรณ์

$$Ia = \frac{Pe}{Ca} \tag{3.11}$$

เมื่อ Ia = กระแสที่ใช้

Pe = กำลังมอเตอร์

Ca = เซลล์แบตเตอรี่

3.15 การคำนวณและการออกแบบ

ในการสร้างรถจักรยานยนต์ไฟฟ้านั้นต้องมีการออกแบบเพื่อให้ได้ขอบเขตของโครงสร้างต่างๆที่สวยงามและ มีความสำคัญในทางวิศวกรรมที่เหมาะสม

น้ำหนักรถ	45	kg
รัศมีล้อ	0.19	m
พื้นที่หน้าตัดรถ	0.94 x 0.6	m^2
สัมประสิทธิ์ในการต้านอากาศ	0.031	
คิดที่ความเร็วประมาณ	40	km/h

3.16 การคำนวณหาแรงต้านทั้งหมดจาก

การขับเคลื่อนรถจักรยานยนต์ไฟฟ้านั้นกล่าวถึงแรงต้านรวมคือแรงต้านในการขับเคลื่อนและถ้าแรงขับเคลื่อนน้อยกว่าแรงต้านทั้งหมดรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าจะไม่สามารถขับเคลื่อนได้

$$Rt = Rr + Ra + Rg \quad (3.12)$$

โดยที่ Rt = แรงต้านทานทั้งหมด

Rr = แรงต้านการหมุนของล้อ

Ra = แรงต้านทานอากาศ

Rg = แรงต้านทานความชัน

แรงต้านการหมุนของล้อหาได้จาก

$$Rr = Kr \times W \quad (3.13)$$

โดยที่ Kr = สัมประสิทธิ์แรงต้านการหมุนของล้อ(0.015)

V = ความเร็ว km/ h

W = น้ำหนักรถ

$\therefore$ Rr = 0.015 x 180 x 9.81 = 26.49 kN

แรงต้านทานอากาศหาได้จาก

$$Ra = Ka.A.V^2 \quad (3.14)$$

โดยที่ Ka = สัมประสิทธิ์แรงต้านทานอากาศ (0.031)

A = พื้นที่หน้าตัดรถ m^2

V^2 = ความเร็ว

∴ Ra = 0.031 x 0.564 x 40^2 = 27.97 kN

แรงต้านทานความชัน

$$Rg = mg \sin \theta \quad (3.15)$$

โดยที่ m = น้ำหนัก kg

g = ค่าโน้มถ่วง

sinθ = มุมความชัน 15 องศา

∴ Rg = 180 x 9.81 sin 15 = 457.02 kN

ค่าความต้านทานรวมทั้งหมดมีค่าเท่ากับ

Rt = 26.49 + 27.97 + 457.02 = 511.48 kN (กรณีทางชัน) (3.16)

Rt = 26.49 + 27.97 = 54.46 kN (กรณีทางเรียบ) (3.17)

เลือก Rt = 54.46 kN (กรณีทางเรียบ) เพราะโครงงานนี้ออกแบบให้ใช้สำหรับทางเรียบ

3.17 คำนวณหากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อน

คำนวณหากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อน เพื่อให้ได้ความเร็วที่ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ตามความต้องการเนื่องจากรถวิ่งด้วยอัตราเร่งคงที่

สมการ

โดยที่แรงขับเคลื่อนที่ล้อ F = หาได้จาก Rt

กำลังขับเคลื่อนที่ล้อหาได้จาก

$$Pw = \frac{FV}{3.6} \quad (3.18)$$

โดยที่ Pw = กำลังเคลื่อนที่ล้อ W

F = ค่าความต้านทาน

V = ความเร็วที่ใช้ km/h

$$Fw = \frac{54.46 \times 40}{3.6} = 605.11 \text{ W}$$

3.18 คำนวณหาสมรรถนะของรถ

กำลังมอเตอร์หาได้จาก

$$Pm = \frac{100xPw}{\text{ประสิทธิภาพ}} \quad (3.19)$$

โดยที่ Pm = กำลังมอเตอร์

Pw = กำลังขับขี่ที่ล้อ

ประสิทธิภาพ = คิดที่ 90 %

$$Pm = \frac{100\times605.11}{90} = 672.34 \text{ W}$$

เลือกใช้ขนาดมอเตอร์ 500 W

3.19 ขับเคลื่อนรถไฟฟ้าให้ได้ความเร็วที่เราต้องการ

$$N = \frac{(v)(1000)}{(2\pi r)(60)} \quad (3.20)$$

V = ความเร็วรถไฟฟ้า km / h

r = รัศมีล้อรถรวมยาง 0.19m

เมื่อต้องการให้รถวิ่งที่ความเร็ว (V) 40 km / h

$$N = \frac{(40)(1000)}{(2\pi)(0.19)(60)} = 558.44 \text{ r.p.m}$$

เลือกใช้รอบของมอเตอร์ 558.44 r.p.m

3.20 คำนวณหากระแสมอเตอร์ที่ใช้

$$P = VI \quad (3.21)$$

เมื่อแรงดัน (V) = 24โวลท์(V)

$$I = \frac{P}{V} \quad (3.22)$$

$$I = \frac{500}{24} = 20.83 \text{ A}$$

กระแสมอเตอร์ที่ใช้ 20.83 A

บทที่ 4

การทดสอบและผลการทดสอบ

4.1 วงจรควบคุมความกว้างของสัญญาณพัลส์ (P.W.M.)

จากวงจรควบคุมความกว้างของสัญญาณพัลส์ต้องการให้ทำงานที่ความถี่คงที่ และ t_{on} , t_{off} สามารถเปลี่ยนแปลงได้ ความถี่ที่ใช้ในโครงงานนี้ 10 KHz วงจรควบคุมความกว้างของสัญญาณพัลส์ได้ใช้ไอซี MC34060A ซึ่งเป็น ไอซีสำเร็จรูป เราสามารถหาค่า R_T และ C_T ได้จากการกำหนดค่า C_T เท่ากับ 0.01 µF ค่าความถี่เท่ากับ 10 KHz ดังนั้นหาค่า R_T ด้วยสมการ

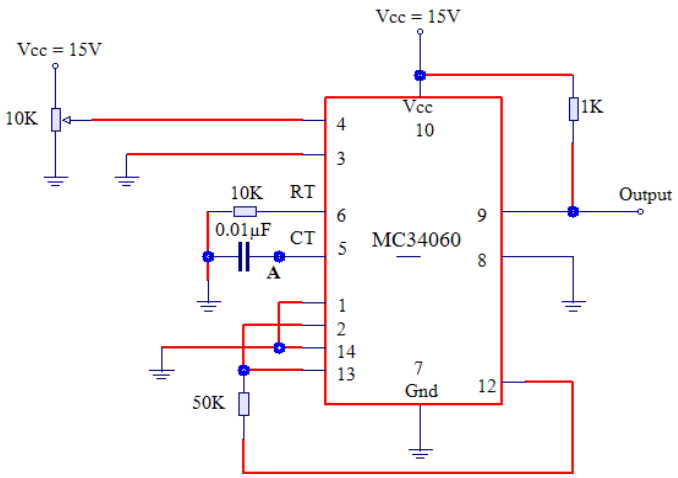
$$f_{ose} = \frac{1.2}{R_T C_T} \qquad (4.1)$$

$$R_T = \frac{1.2}{R_T C_T}$$

$$R_T = \frac{1.2}{(0.01\times10^{-6})(10\times10^{3})}$$

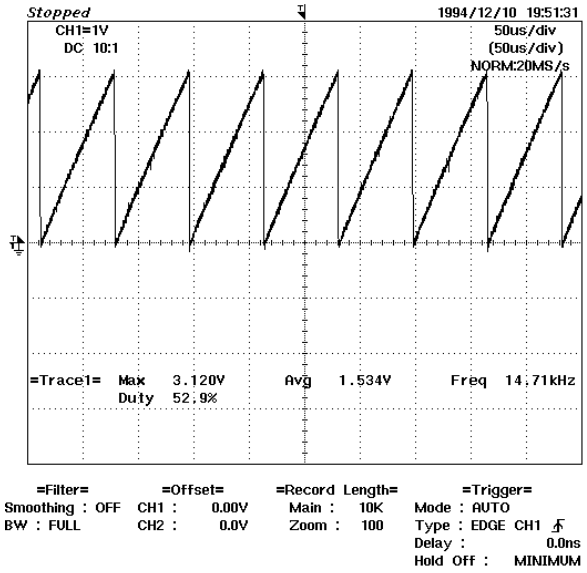
R_T = 12 กิโลโอห์ม

ดังนั้นจึงได้ค่า R_T = 12 กิโลโอห์ม เมื่อทำการทดลองแล้วค่าของความถี่ได้ตามต้องการคือ 10 KHz ทำการเปลี่ยนค่าของ C_T ให้มากขึ้นจะทำให้สัญญาณฟันเลื่อย มีความชันมากขึ้น



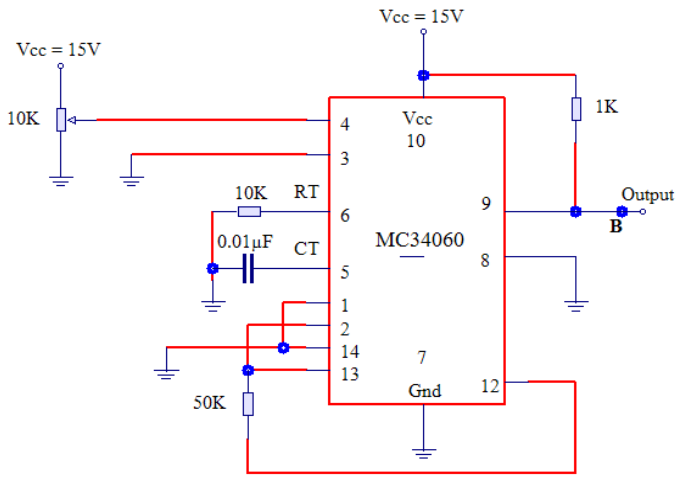
ภาพที่ 4.1 แสดงการวัด Output ของ คาปาซิเตอร์ (C) ที่จุด A

จากภาพที่ 4.1 แสดงการวัด Output ของ คาปาซิเตอร์ (C) ที่จุด A โดยใช้ไอซีเบอร์ MC34060A จะถูกควบคุมจากระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ป้อนเข้าทางอินพุทที่ขา 4 ที่ความถี่ 10 KHz ค่าความถี่ของสัญญาณเอาท์พุทจะถูกกำหนดที่ค่าความต้านทาน (R_T) และค่าคาปาซิเตอร์ (C_T) ตามสมการที่ 3.2



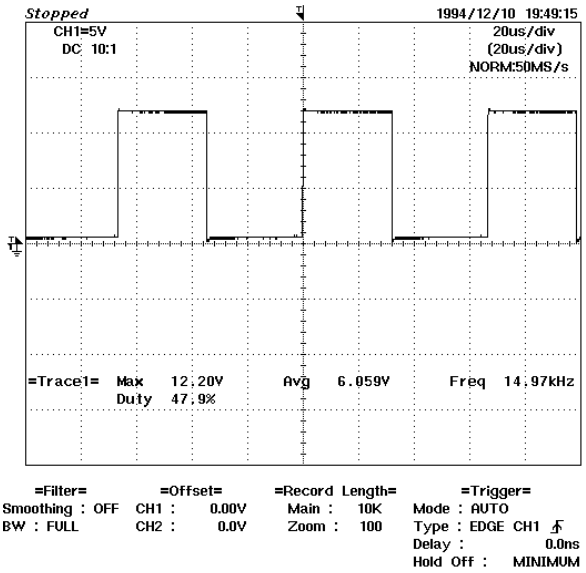
- ปรับสโคปที่ Volt/Div = 1 , Time/Div = 50 µsec ที่สายโปรพ = ×10

ภาพที่ 4.2 แสดงภาพสัญญาณฟันเลื่อยของ คาปาซิเตอร์ (C) ที่จุด A



ภาพที่ 4.3 แสดงการวัด Output ของสัญญาณ P.W.M. ที่จุด B

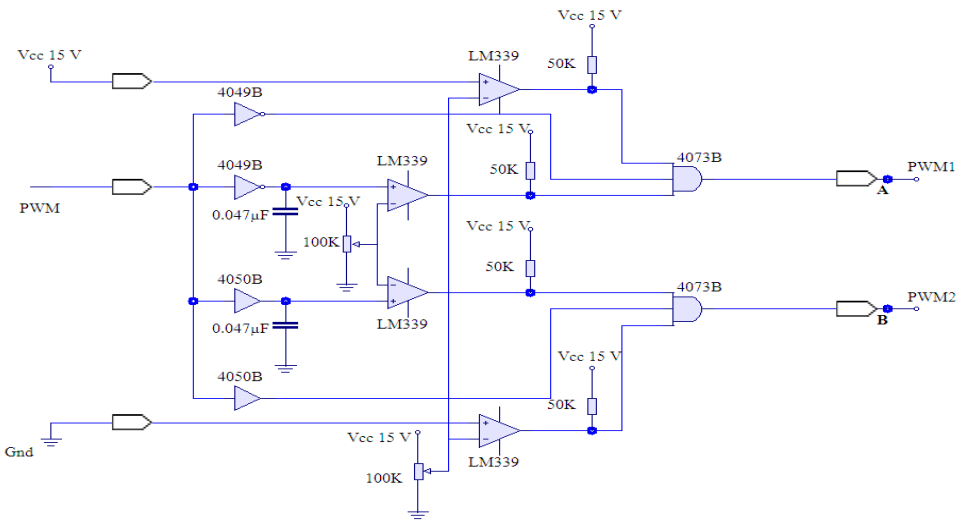
จากภาพที่ 4.3 แสดงการวัด Output ของสัญญาณ P.W.M. ที่จุด B จะได้สัญญาณพัลส์ออกมาเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม โดยที่สัญญาณ Output ที่ได้มาจากค่าความต้านทาน (R_T) = 10 กิโลโฮห์ม และค่าคาปาซิเตอร์ (C_T) = 0.01µF สัญญาณ Output ที่ออกมาจะนำไปควบคุมวงจรเลื่อนเฟส



- ปรับสโคปที่ Volt/Div = 5, Time/Div = 20 µsec ที่สายโปรพ = ×10

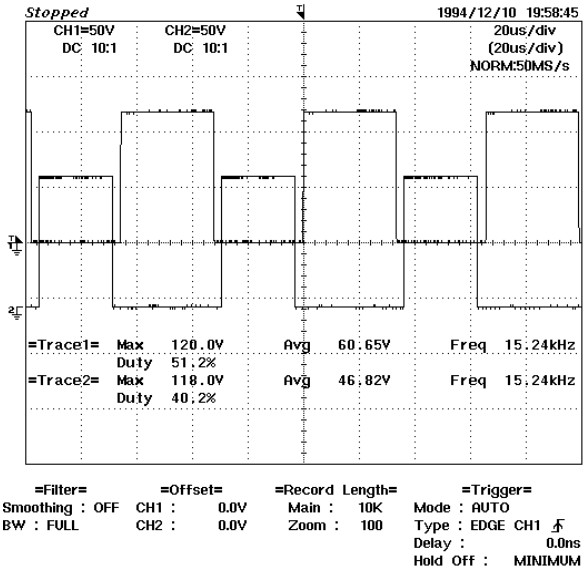
ภาพที่ 4.4 แสดงภาพสัญญาณสี่เหลี่ยมของ P.W.M. ที่จุด B

4.2 วงจรเลื่อนเฟส (Phase Shift)



ภาพที่ 4.5 แสดงการวัดสัญญาณ Output ของวงจรเลื่อนเฟส ที่จุด A,B

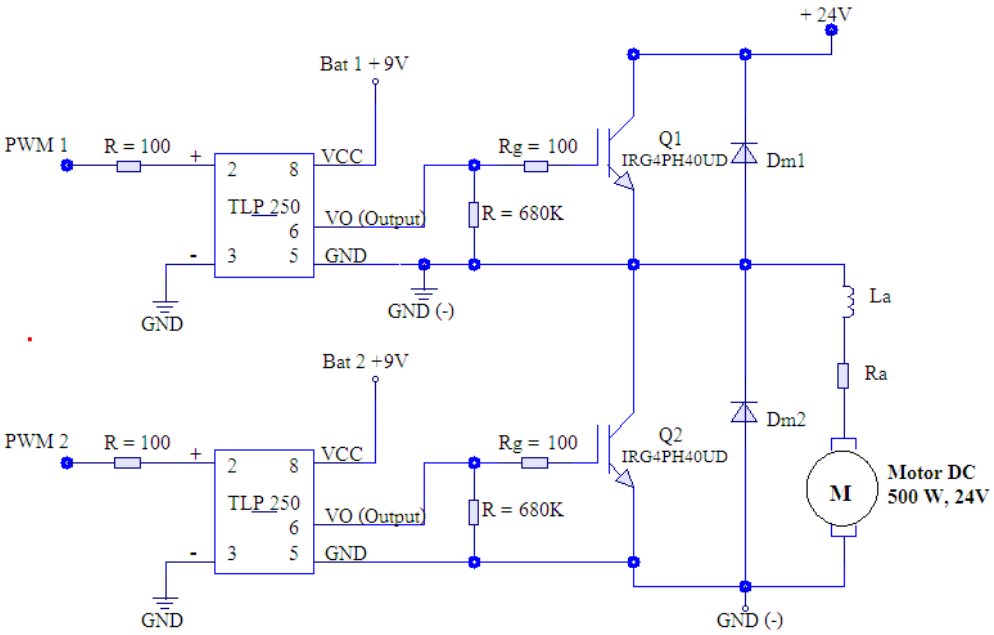
จากภาพที่ 4.5 แสดงการวัดสัญญาณ Output ของวงจรเลื่อนเฟส เนื่องจากการออกแบบการขับเคลื่อนมอเตอร์ในที่นี้เป็นแบบ 2 ควอตแดนซ์ จึงมีโอกาสที่จะทำงานพร้อมกันได้อาจทำให้เกิดการลัดวงจรทีไอจีบีที จึงได้ใช้วงจรเลื่อนเฟสควบคุมสัญญาณทั้งสองให้มีการหน่วงเวลาเพื่อป้องกันการลัดวงจรที่ไอจีบีทีส่วนความต้านทานปรับค่าได้มีไว้ใช้ในกรณีที่ต้องการควบคุม Dead Time



- ปรับสโคปที่ Volt/Div = 50 , Time/Div = 20 μsec ที่สายโปรพ = ×10

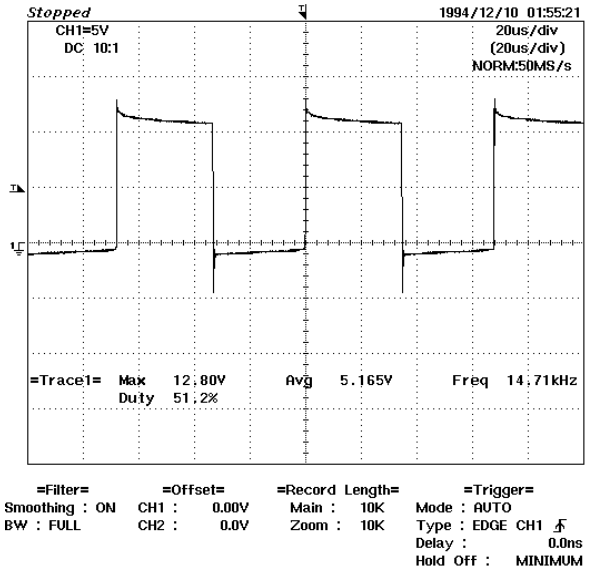
ภาพที่ 4.6 แสดงสัญญาณ Output ของวงจรเลื่อนเฟส ที่จุด A,B และ Dead Time

4.3 วงจรขับเกตไอจีบีที (Gate Driver Circuit)



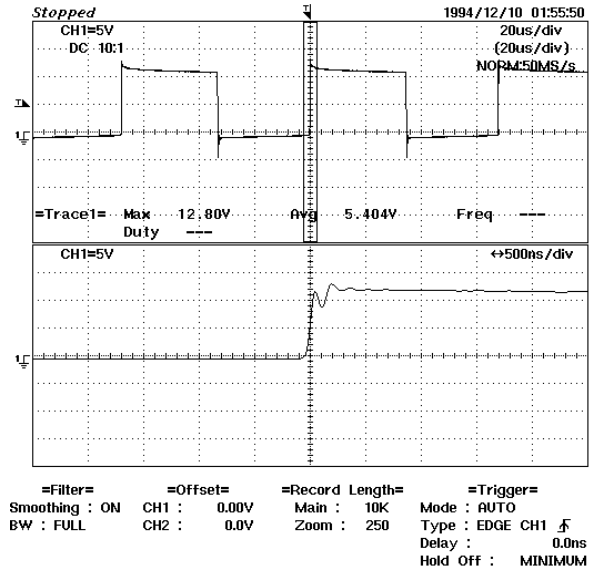
ภาพที่ 4.7 แสดงวงจรการขับเกตไอจีบีที แบบ 2 ควอตแดนซ์ โดยใช้ไอซี TLP250

จากภาพที่ 4.7 แสดงการใช้ไอซี TLP250 ขับขาเกต แบบ 2 ควอตแดนซ์ โดยมีขาอินพุท 2 ขาคือ PWM1 และ PWM2 ซึ่งรับสัญญาณจากวงจรการสร้างสัญญาณ พี.ดับเบิ้ลยู.เอ็ม.(P.W.M.) ที่ผ่านวงจรเลื่อนเฟสแล้ว ในที่นี้เลือกใช้ ไอจีบีที ของบริษัท International Rectifier(IR) เบอร์ IRG4PH40UD อัตราทนแรงดันสูงสุดจะเท่ากับ 1200 โวลท์ การตอบสนองความถี่1-10 กิโลเฮิร์ท อัตราทนกระแสต่อเนื่องที่คอลเลคเตอร์ 41 แอมแปร์ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



- ปรับสโคปที่ Volt/Div = 50 , Time/Div = 50 µsec ที่สายโปรพ = ×10

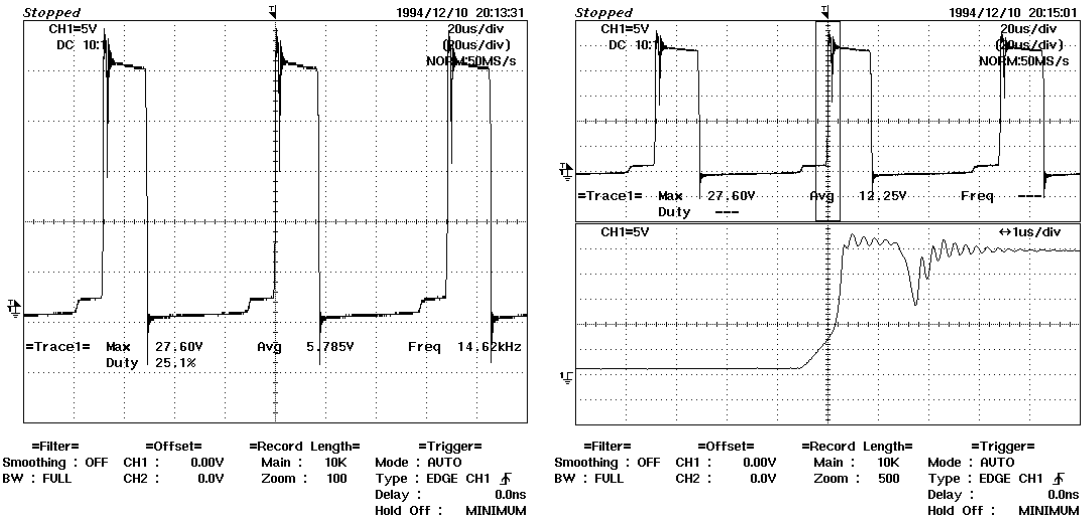
ภาพที่ 4.8 แสดงสัญญาณ Output ของMotor ที่จุด A



ภาพที่ 4.9 รูปคลื่นแรงดันของ Motor ที่จุด A

4.4 การทดลองวัดสัญญาณดิวตี้ไซเคิลเทียบกับแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์

การทดลองปรับดิวตี้ไซเคิลที่ 25 เปอร์เซ็นต์



ก. ข.

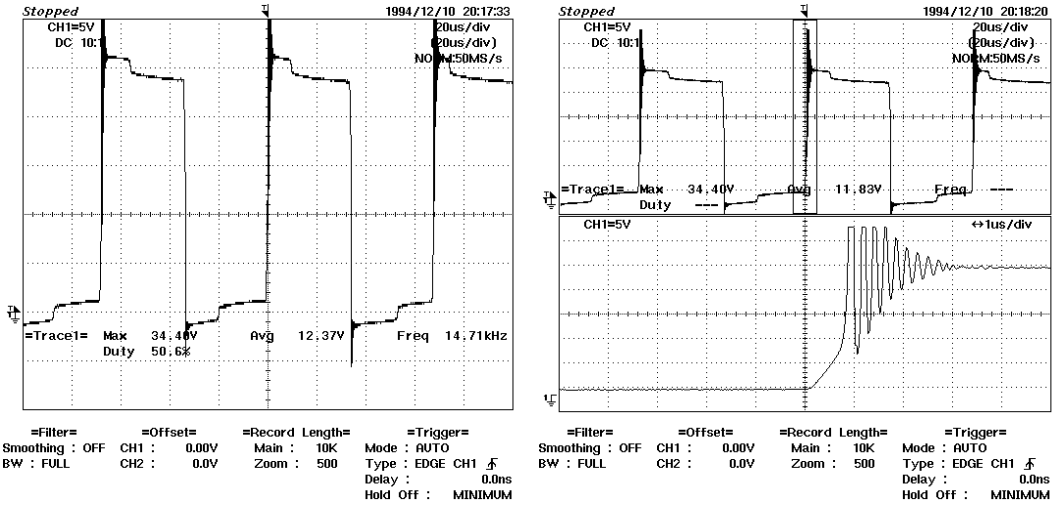
ภาพที่ 4.10 การปรับดิวตี้ไซเคิล 25 เปอร์เซนต์

ก. แสดงสัญญาณการปรับแรงดันของ Motor ที่จุด A

ข. ภาพขยายของสัญญาณแรงดันเอาท์พุทที่ความกว้างของพัลส์

จากภาพที่ 4.10 ก. แสดงสัญญาณการปรับภาพสัญญาณแรงดันที่ขั้วของอาร์เมเจอร์เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับมอเตอร์จากในภาพนี้เป็นการปรับดิวตี้ไซเคิลที่ 25 เปอร์เซ็นต์จะเห็นว่ามีการเกิดกระเพื่อมของสัญญาณ (Overshoot) ที่สูงมากๆเนื่องจากในการขับมอเตอร์นี้มีโหลดของมอเตอร์อยู่ด้วยจึงมีการเกิดกระเพื่อมของสัญญาณสูง เป็นอีกเท่าของรูปพัลส์ของสัญญาณชอปเปอร์สัญญาณที่กระเพื่อมนี้ถ้ามีมากอาจทำให้เกิดความเสียหายกับวงจรได้ภาพที่ 4.10 ข. ภาพขยายของสัญญาณ (Overshoot) ที่เกิดจากการปรับดิวตี้ไซเคิลที่ 25 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่ามีการเกิดแรงดันพุ่งเกินเป็นสองเท่าของแรงดันที่ใช้งานอยู่เนื่องจากการปิดของสวิตช์ของไอจีบีทีในชั่วขณะ และจะเห็นภายในรูปสัญญาณขอมอเตอร์ที่ทำให้เกิดแรงดันต้านกลับ (BackEmf) ที่ไดโอดไหลคืนพลังงานและแรงบิดที่โหลด ณ ระดับความเร็วคงที่ ผู้ออกแบบจึงต้องคำนึงถึงรายละเอียดในจุดนี้เพื่อใช้ในการออกแบบไอจีบีทีที่เหมาะสมมาใช้งานที่สามารถทนแรงดันพุ่งเกินได้จะไม่ทำให้ไอจีบีทีเสียหาย

การทดลองปรับดิวตี้ไซเคิลที่ 50 เปอร์เซ็นต์



ก. ข.

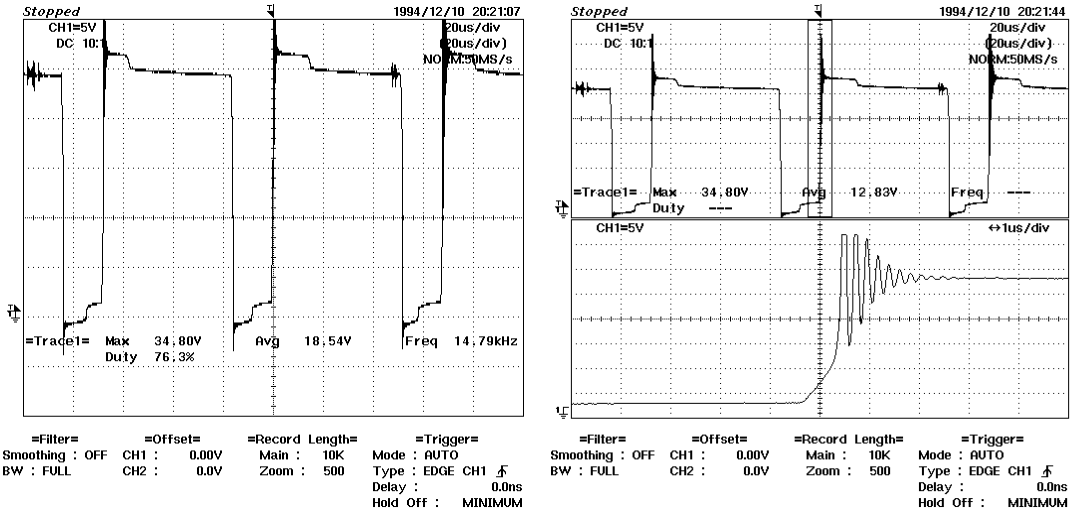
ภาพที่ 4.11 การปรับดิวตี้ไซเคิล 50 เปอร์เซนต์

ก. แสดงสัญญาณการปรับแรงดันของ Motor ที่จุด A

ข. ภาพขยายของสัญญาณแรงดันเอาท์พุทที่ความกว้างของพัลส์

จากภาพที่ 4.11 ก. แสดงสัญญาณการปรับภาพสัญญาณแรงดันที่ขั้วของอาร์เมเจอร์เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับมอเตอร์จากในภาพนี้เป็นการปรับดิวตี้ไซเคิลที่ 50 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่าสัญญาณพัลส์มีความกว้างเพิ่มขึ้นและในทางเดียวกันก็จะมีการเกิดแรงดันพุ่งเกิน (Overshoot) ที่สูงมากๆเนื่องจาก ในการขับมอเตอร์นี้มีโหลดของมอเตอร์อยู่ด้วย จึงมีการกระเพื่อมของสัญญาณสูงเป็นสองเท่าของรูปพัลส์ของสัญญาณชอปเปอร์สัญญาณพุ่งเกินนี้ถ้ามีมากอาจทำให้เกิดความเสียหายกับวงจรได้ภาพที่ 4.11 ข. ภาพขยายของสัญญาณ (Overshoot) ที่การปรับดิวตี้ไซเคิลที่ 50 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่ามีการเกิดแรงดันพุ่งเกินเป็นสองเท่าของแรงดันที่ใช้งานอยู่ เนื่องจากการปิดของสวิตช์ของไอจีบีทีในชั่วขณะ และจะเห็นภายในรูปสัญญาณขอมอเตอร์ที่ทำให้เกิดแรงดันต้านกลับ (BackEmf) ที่ไดโอดไหลคืนพลังงานและแรงบิดที่โหลด ณ ระดับความเร็วคงที่ผู้ออกแบบจึงต้องคำนึงถึงรายละเอียดในจุดนี้เพื่อใช้ในการออกแบบไอจีบีทีที่เหมาะสมกับการนำมาใช้งานที่สามารถทนแรงดันพุ่งเกินนี้ได้จะไม่ทำให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์ไอจีบีที

การทดลองปรับดิวตี้ไซเคิลที่ 75 เปอร์เซ็นต์



ก. ข.

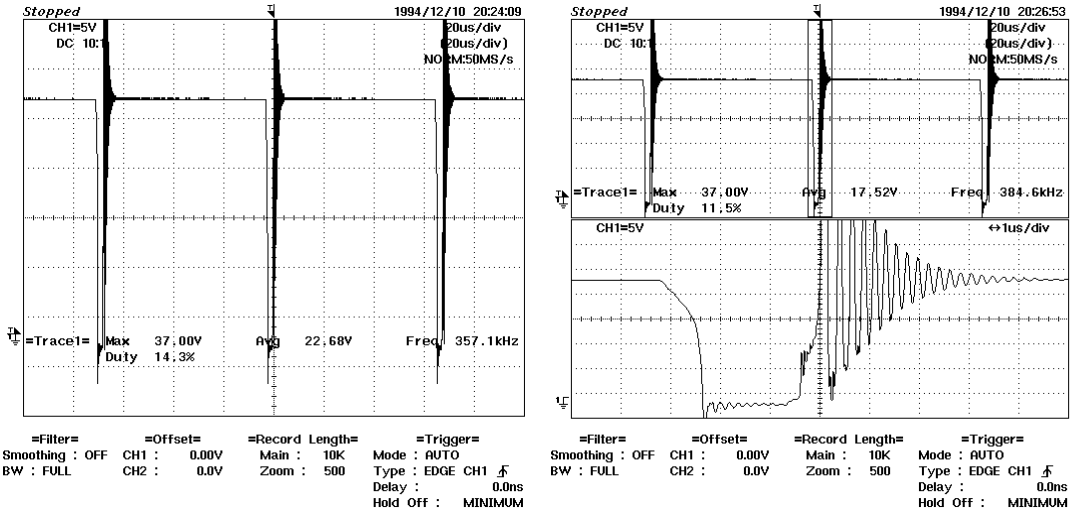
ภาพที่ 4.12 การปรับดิวตี้ไซเคิล 75 เปอร์เซนต์

ก. แสดงสัญญาณการปรับแรงดันของ Motor ที่จุด A

ข. ภาพขยายของสัญญาณแรงดันเอาท์พุทที่ความกว้างของพัลส์

จากภาพที่ 4.12 ก. ภาพแสดงสัญญาณการปรับภาพสัญญาณแรงดันที่ขั้วของอาร์เมเจอร์เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับมอเตอร์จากในภาพนี้เป็นการปรับ ดิวตี้ไซเคิลที่ 75 เปอร์เซ็นต์จะเห็นว่าสัญญาณพัลส์มีความกว้างเพิ่มขึ้นและในทางเดียวกันก็จะมีการเกิดกระเพื่อมของสัญญาณ (Overshoot) ที่สูงมากๆตามเนื่องจากในการขับมอเตอร์นี้ มีโหลดของมอเตอร์ซึ่งเป็นขวดลวดด้วยจึงทำให้มีการเกิดกระเพื่อมของสัญญาณสูงเป็นอีกเท่าของรูปพัลส์ของสัญญาณชอปเปอร์สัญญาณที่กระเพื่อมนี้ถ้ามีมากอาจทำให้เกิดความเสี่ยหายกับวงจรได้ภาพที่ 4.12 ข. ภาพขยายของสัญญาณ (Overshoot) ที่การปรับดิวตี้ไซเคิลที่ 75 เปอร์เซ็นต์จะเห็นว่ามีการเกิดแรงดันพุ่งเกินของสัญญาณชั่วขณะ (Tran Sient) แต่จะสังเกตได้ว่าแรงดันพุ่งเกินนี้จะมีน้อยกว่าการปรับดิวตี้ไซเคิลที่ 50 เปอร์เซ็นต์เนื่องจากมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบสูงจึงทำให้สภาวะแรงดันพุ่งเกินชั่วขณะนั้นมีน้อยกว่าการปรับดิวตี้ไซเคิลที่ค่าน้อยๆและจะเห็นภายในรูปสัญญาณขอมอเตอร์ที่ทำให้เกิดแรงดันต้านกลับ (BackEmf) ที่ไดโอดขณะไหลคืนพลังงานและแรงบิดที่โหลด ณ ระดับความเร็วคงที่

การทดลองปรับดิวตี้ไซเคิลเกือบ 100 เปอร์เซ็นต์



ก. ข.

ภาพที่ 4.13 การปรับดิวตี้ไซเคิลเกือบ 100 เปอร์เซนต์

ก. แสดงสัญญาณการปรับแรงดันของ Motor ที่จุด A

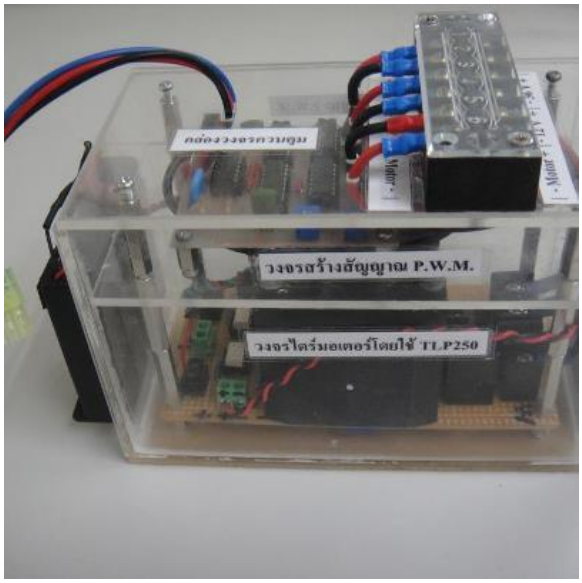
ข. ภาพขยายของสัญญาณแรงดันเอาท์พุทที่ความกว้างของพัลส์

จากภาพที่ 4.13 ก. ภาพแสดงสัญญาณการปรับภาพสัญญาณแรงดันที่ขั้วของอาร์เมเจอร์เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับมอเตอร์จากในภาพนี้เป็นการปรับ ดิวตี้ไซเคิลเกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่าสัญญาณพัลส์มีความกว้างเพิ่มขึ้นและในทางเดียวกันก็จะมีการเกิดกระเพื่อมของสัญญาณ (Overshoot) ที่สูงมากๆตาม เนื่องจากในการขับมอเตอร์นี้ มีโหลดของมอเตอร์ซึ่งเป็นขวดลวดด้วยจึงทำให้มีการเกิดกระเพื่อมของสัญญาณสูงเป็นอีกเท่าของรูปพัลส์ของสัญญาณชอปเปอร์สัญญาณที่กระเพื่อมนี้ถ้ามีมากอาจทำให้เกิดความเสี่ยหายกับวงจรได้ภาพที่ 4.13 ข. ภาพขยายของสัญญาณ (Overshoot) ที่การปรับดิวตี้ไซเคิลเกือบ 100 เปอร์เซ็นต์จะเห็นว่ามีการเกิดแรงดันพุ่งเกินของสัญญาณชั่วขณะ (Tran Sient) แต่จะสังเกตได้ว่าแรงดันพุ่งเกินนี้จะมีมากกว่าการปรับดิวตี้ไซเคิลที่ 75 เปอร์เซ็นต์เนื่องจากมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบสูงจึงทำให้สภาวะแรงดันพุ่งเกินชั่วขณะนั้นมีน้อยกว่าการปรับดิวตี้ไซเคิลที่ค่าน้อยๆและจะเห็นภายในรูปสัญญาณขอมอเตอร์ที่ทำให้เกิดแรงดันต้านกลับ (BackEmf) ที่ไดโอดขณะไหลคืนพลังงานและแรงบิดที่โหลด ณ ระดับความเร็วคงที่

4.5 ข้อมูลทางเทคนิคของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า

ภาพที่ 4.14 แสดงด้านหน้าของตัวรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า

ภาพที่ 4.15 แสดงด้านข้างของตัวรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า



ภาพที่ 4.16 แสดงวงจรควบคุมรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า

เครื่องต้นกำลัง	มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก
แรงเคลื่อนไฟฟ้าพิกัดมอเตอร์	24 V
กระแสกระตุ้นขดลวดอาร์เมเจอร์	27 A
กำลังไฟฟ้ามอเตอร์	500 W
แหล่งจ่ายไฟฟ้า	แบตเตอรี่ 12 V 21Ahr จำนวน 3 ชุด
ต่ออนุกรมได้แรงเคลื่อน	36 V กระแส 21Ahr
แหล่งจ่ายวงจรควบคุม	15 V
น้ำหนักรถโดยประมาณ	45 kg
น้ำหนักคนโดยประมาณ	80 kg
น้ำหนักแบตเตอรี่ก้อนละ6kg ในที่นี้ ใช้ 3 ลูก	18 kg
ความกว้างของตัวรถ	0.60 m
ความสูงของตัวรถจากล้อถึงมือจับ	0.94m
ความสูงของตัวรถจากล้อถึงเบาะนั่ง	0.75 m
ความยาวของตัวรถ	1.50 m
รัศมีของล้อรถรวมล้อยาง	0.19 m

ใช้สายพานเป็นตัวส่งกำลังจากมู่เลย์ตัวหน้าซึ่งติดกับมอเตอร์โดยติดตั้งมอเตอร์ไว้ที่ล้อหลัง

หมายเหตุ น้ำหนักของรถและน้ำหนักของคนอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงภายหลัง

บทที่ 5

สรุป

จากการทำโครงงานรถจักรยานยนต์ไฟฟ้านี้ได้นำมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมาติดตั้งในโครงสร้างของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าเพื่อให้เหมาะสมสำหรับติดตั้งมอเตอร์ดีซี 24 โวลต์ 500 วัตต์ สำหรับขับเคลื่อนการติดตั้งมอเตอร์ไว้ที่ล้อหลังโดยใช้สายพานเป็นตัวส่งกำลังจากมู่เล่ย์ตัวหน้าติดกับตัวมอเตอร์ไปยังมู่เล่ย์หลังซึ่งติดกับล้อหลังของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าโดยใช้วงจรชอปเปอร์ 2 ควอตแดนซ์ มาเป็นวงจรควบคุม ออกแบบชุดวงจรควบคุมสัญญาณโดยใช้ไอซีเบอร์ MC34060A ในการสร้างสัญญาณ P.W.M. และชุดวงจรเลื่อนเฟสสัญญาณโดยใช้ไอซีเบอร์ LM339N,CD4049UBE,CD4050BE และ HEF4073BPในส่วนของวงจรขับมอเตอร์ใช้ไอซี TLP250 และ IGBT เบอร์ IRG4PC40Uเพื่อป้อนให้กับไอจีบีทีซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวสวิตช์ชิ่งให้แก่วงจรที่ใช้ในการควบคุมการไหลของกระแสเข้าสู่มอเตอร์ ถ้าดิวตี้ไซเคิลมีค่าน้อยกระแสจะไหลน้อยมอเตอร์จะหมุดช้าทำความเร็วน้อย แต่ถ้าดิวตี้ไซเคิลมีค่ามากกระแสก็ไหลมากมอเตอร์จะหมุดได้เร็วทำความเร็วมากขึ้น ซึ่งรถจักรยานยนต์ไฟฟ้านี้ สามารถวิ่งด้วยน้ำหนักรถจักยานยนต์กับน้ำหนักคนไม่เกิน 180 กิโลกรัม จากการที่ผู้ทำโครงงานนี้ได้ทำการขับขี่ ในการขับขี่นั้นไม่ควรปรับระดับความเร็วแบบเฉียบพลัน เพราะจะเกิดแรงดันพุ่งเกินสูงมาก อาจทำให้ IGBT เสียหาย จึงต้องค่อยๆ ปรับทีละน้อย เพื่อป้องกันการเกิดแรงดันพุ่งเกินสูง ตัวโครงรถนั้นยังมีน้ำหนักมากเกินไป คือประมาณ 45 กิโลกรัม ควรออกแบบให้รถมีน้ำหนักลดลงสรุปโดยรวมแล้วรถไฟฟ้าคันนี้สามารถที่จะใช้งานวิ่งได้จริงและยังมีประสิทธิในการใช้งานพอสมควรหากแต่ว่าจะต้องใช้อุปกรณ์และส่วนประกอบบางอย่างที่มีประสิทธิภาพ เนื่องด้วยในงบประมาณ ระยะเวลาและอุปกรณ์ที่ใช้จำกัดในทางปฏิบัติจึงทำให้มีประสิทธิภาพของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าออกมาได้ไม่เต็มที่ อย่างที่ได้ออกแบบไว้ **ข้อเสนอแนะ** 1. รถจักรยานยนต์ไฟฟ้าคันนี้ ถูกสร้างขึ้นมาโดยออกแบบไม่ให้ใช้งานหนักมากนัก ผู้ใช้ควรศึกษาวิธีการใช้งานให้ถูกต้องก่อนนำไปใช้เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายขึ้น ผู้ใช้ควรได้รับข้อมูลที่ถูกต้องก่อนนำไปใช้งานทุกครั้ง 2. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในโครงงานนี้เป็นแบบกระตุ้นแยก ซึ่งต้องใช้พลังงานจากแบตเตอรี่เป็นจำนวนมากซึ่งจะทำให้โหลดเพิ่มขึ้นมากไปด้วย มอเตอร์ที่เหมาะสมกับโครงงานนี้ คือ แบบอนุกรมใช้พลังงานจากแบตเตอรี่น้อยคุณลักษณะต่างๆดีกว่ามอเตอร์ชนิดอื่นๆ แต่มีราคาสูงมากจึงเลือกที่จะใช้มอเตอร์ชนิดกระตุ้นที่มีคุณลักษณะใกล้เคียงกับมอเตอร์ชนิดอนุกรม 3. การเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟ จะทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเกิดความเสียหายได้ง่าย จึงใช้การเบรกทางกลเข้ามาช่วยในการเบรกแทน และยังมีประสิทธิภาพในการเบรกที่ดีจึงนำมาใช้ในการหยุดรถ สำหรับรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าคันนี้ 4.

คันเร่งของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าคันนี้เป็นแบบความต้านทานปรับค่าจึงทำให้เวลาใช้งานไปนานๆ จะทำให้เสื่อมสภาพลงได้ ในปัจจุบันมีคันเร่งที่ใช้สำหรับรถไฟฟ้าโดยตรงเป็นแบบแม่เหล็กและมีชุดควบคุมคันเร่งอยู่แล้ว ทางคณะผู้จัดทำโครงงานนี้ได้นำมาใช้งานโดยต่อร่วมกับวงจรชอปเปอร์ แต่ทั้งสองชุดนี้ต่อใช้งานไม่เข้ากัน

เอกสารอ้างอิง

[1] มงคล ทองสงคราม เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง พิมพ์ครั้งที่ 2 บริษัท รามาการพิมพ์ จำกัด กรุงเทพมหานคร

[2] MhammadH.Rashid , Power Electronics circuit , Devices , and Application , Pentice Hall , 1993

[3] มงคล ทองสงคราม2543. อิเล็กทรอนิกส์กำลัง. พิมพ์ครั้งที่ 4 . กรุงเทพ. วี เจ พริ้นติ้ง

[4] นิมิต บุญภิรมย์ “การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบฟัซซี่ชนิดปรับค่าด้วยตัวเอง” วิทยานิพนธ์ ภาควิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2541

[5] เริงชัย นารีผล และ สำเริง บุญแย้ม “การควบคุมความเร็วรอบดีซีมอเตอร์ด้วยคอมพิวเตอร์” ปริญญานิพนธ์บัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม 2539

[6] Datasheet. On Semiconductor. http:/onsemi.com

ภาคผนวก