

รถพลังไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วยตัวควบคุมแบบชอปเปอร์

Electric Car Drive with Chopper Control

พูนศรี วรรณการ และ พนา ดุสิตากร

Poonsri Wannakran and Pana Dusitakorn

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเกี่ยวกับรถพลังไฟฟ้า ที่นำความรู้ในเรื่องหลักการชอปเปอร์มาใช้ในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบซีรีย์ เพื่อนำมาใช้ในการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงขนาดแรงดัน 36 โวลต์ที่เป็นตัวขับเคลื่อนของรถ โดยใช้แหล่งจ่ายพลังงานจากแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ 100 Ah จำนวน 3 ลูก และในส่วนของวงจรชอปเปอร์ใช้ออปแอมป์เป็นตัวสร้างสัญญาณเพื่อควบคุมการทำงานของมอสเฟต ในส่วนของโครงสร้างรถนั้นจะเป็นการนำส่วนประกอบของรถกอล์ฟมาใช้ ซึ่งจะขับเคลื่อนจากเพลลาของมอเตอร์ไปยังชุดเฟืองโดยตรงด้วยอัตราทด 13 ต่อ 1 เพื่อใช้ในการขับเคลื่อน โดยที่รถจะสามารถขับเคลื่อนได้ด้วยความเร็วไม่เกิน 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และรับน้ำหนักได้ไม่เกิน 400 กิโลกรัม

คำสำคัญ: รถพลังไฟฟ้า , ชอปเปอร์ , มอสเฟต ,

ABSTRACT

This paper presents about an electric car uses the fact theory of the Chopper to control of direct current series motor. This is to trans action to the speed control that troops the vehicle, which uses 36 voltages direct electronic. Sources will energize from the battery size of 12 voltages 100 Ah with the number of 3 quantities. In the part of the Chopper circuit the op-amp will rebuild the signal to manage whole system of MOSFET. The vehicle parts will be using golf carter. It will move by the thigh of motor to the cogs of a gear wheel for further acceleration of 13:1 In which the vehicle will move with approximately not faster than 40 kilometers per hour speed and will gain not more than 400 kilograms.

Keywords: electric car , Chopper , MOSFET

บทนำ

เนื่องจากในปัจจุบันมนุษย์ได้มีการใช้ยานพาหนะในการเดินทาง ซึ่งยานพาหนะส่วนใหญ่จะใช้เครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงเป็นตัวขับเคลื่อนเครื่องยนต์จะปล่อยไอเสียออกมาในอากาศทำให้เกิดมลพิษในสิ่งแวดล้อมเป็นอันตรายต่อมนุษย์ ดังนั้นบทความนี้จึงมีแนวคิดที่จะสร้างยานพาหนะที่ใช้พลังงานจากไฟฟ้ามาเป็นตัวขับเคลื่อนเพื่อลดมลภาวะและไม่สร้างมลพิษให้กับสิ่งแวดล้อม โดยอาศัยหลักการขับเคลื่อนแบบชอปเปอร์มาใช้ในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบซีรี่ย์ เพื่อนำมาใช้ในการปรับความเร็วของรถไฟฟ้า ซึ่งในปัจจุบันถือเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีความเหมาะสมในการใช้งานกับยานพาหนะในอนาคต

ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบ

ทฤษฎีของวงจรชอปเปอร์

เป็นวิธีการที่ใช้ในการควบคุมแรงดันไฟตรงแบบควบคุมการตัดต่อ(DC chopper) เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงมีน้ำหนักเบาขนาดเล็กและตอบสนองได้รวดเร็วทั้งยังสามารถคืนพลังงานกลับได้ด้วย ตัวอย่าง เช่น งานประเภทลากจูงยานพาหนะที่ใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่าย เช่น รถ Folklift รถลาก (trolley) และงานควบคุมตำแหน่งซึ่งใช้มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร การเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตโดยวิธี DC chopper สามารถทำได้ 3 วิธี

1. การเปลี่ยนแปลงความถี่ในการตัด แต่ช่วงความถี่คงที่เรียกว่า Frequency modulation
2. การเปลี่ยนแปลงช่วงกว้างในการตัด แต่ความถี่คงที่เรียกว่า PWM (Pulse Width Modulation)
3. การเปลี่ยนแปลงทั้งความถี่และช่วงกว้างเรียกว่า Pulse width and Frequency modulation

ความถี่ที่ใช้ในการตัดต่อแรงดันมีผลต่อการไหลของกระแสอาร์เมเจอร์ต่อเนื่องหรือไม่ต่อเนื่อง และไม่ควรมีความถี่มากเกินไปเพราะจะทำให้เกิดค่า Switching Loss สูง โดย DC chopper ที่สร้างขึ้นมีคุณสมบัติดังนี้

- สามารถให้แรงดันเอาต์พุตที่มีค่าเป็นบวก ศูนย์ และลบ กระแสสามารถไหลได้ทั้ง 2 ทิศทาง เพื่อให้ทำงานครบทั้ง 4 ควอดแรนต์
- ค่าแรงดันเฉลี่ยเอาต์พุตของ DC chopper จะเปลี่ยนอย่างเชิงเส้นกับแรงดันควบคุมอินพุต โดยไม่ขึ้นอยู่กับโหลดที่ต่อกับมอเตอร์
- กระแสอาร์เมเจอร์มีค่า Form factor ดีขึ้นซึ่งช่วยลดการแกว่งของความเร็วและแรงบิดจากมอเตอร์

$$\text{Form factor} = \frac{I_{a(\text{rms})}}{I_{a(\text{average})}} \quad (1)$$

โดย

I_a คือ กระแสอาร์เมเจอร์

หลักการทำงานของวงจรฟลูบริดจ์ดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์

- การทำงานแบบ Forward motoring ใน Quadrant ที่ 1

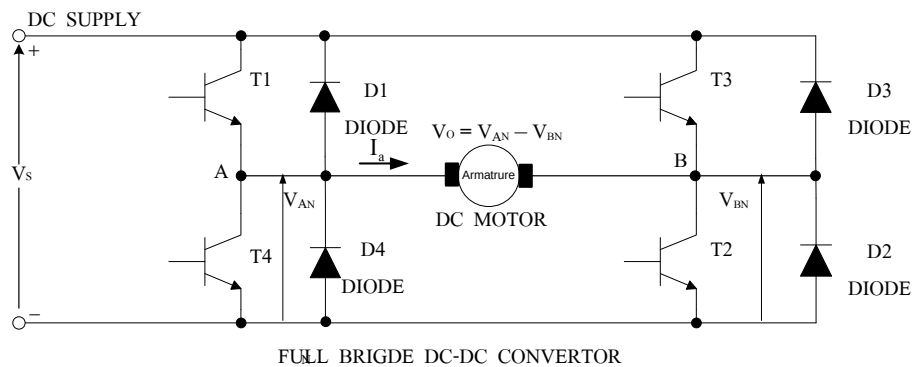
กำหนดให้ช่วงการทำงานแบ่งได้ 4 ช่วงคือ I, II, III และ IV ค่าแรงดันเอาต์พุตชั่วขณะเท่ากับ

$$V_o = V_s \quad \text{ที่เวลา } t_0 < t < t_1 \quad (\text{T1 และ T2 นำกระแส}) \text{-----I}$$

$$V_o = 0 \quad \text{ที่เวลา } t_1 < t < t_2 \quad (\text{T1 และ T3 นำกระแส}) \text{-----II}$$

$$V_o = V_s \quad \text{ที่เวลา } t_2 < t < t_3 \quad (\text{T1 และ T2 นำกระแส}) \text{-----III}$$

$$V_o = 0 \quad \text{ที่เวลา } t_3 < t < t_4 \quad (\text{T2 และ T4 นำกระแส}) \text{-----IV}$$



รูปที่ 1 วงจรฟลูบริดจ์ดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์เมื่อทำงานแบบ Forward motoring

ขั้นตอนการทำงานของวงจร

- การทำงานแบบ Forward motoring ใน Quadrant ที่ 1

กำหนดให้ช่วงการทำงานแบ่งได้ 4 ช่วงคือ I, II, III และ IV ค่าแรงดันเอาต์พุตชั่วขณะเท่ากับ

$$V_o = V_s \quad \text{ที่เวลา } t_0 < t < t_1 \quad (\text{T1 และ T2 นำกระแส}) \text{-----I}$$

$$V_o = 0 \quad \text{ที่เวลา } t_1 < t < t_2 \quad (\text{T1 และ T3 นำกระแส}) \text{-----II}$$

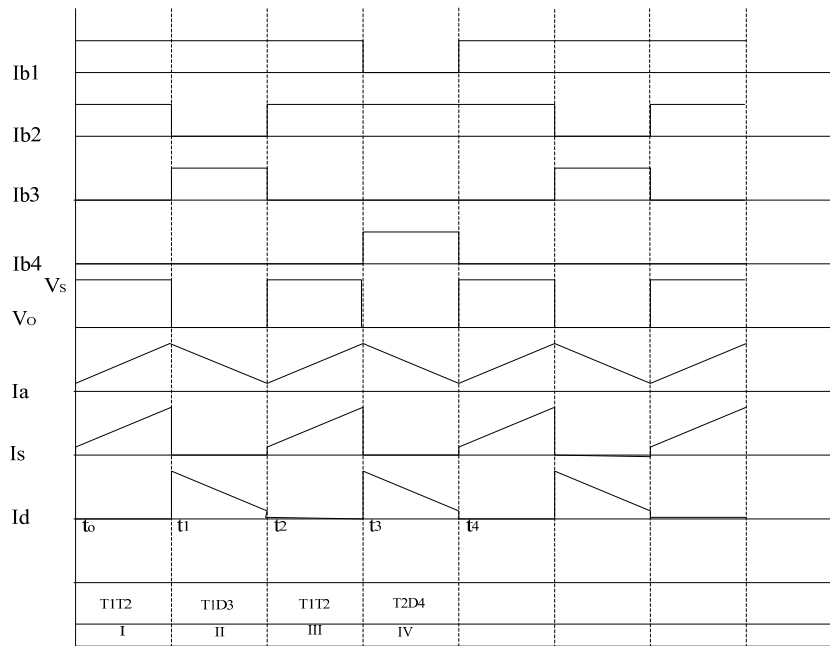
$$V_o = V_s \quad \text{ที่เวลา } t_2 < t < t_3 \quad (\text{T1 และ T2 นำกระแส}) \text{-----III}$$

$$V_o = 0 \quad \text{ที่เวลา } t_3 < t < t_4 \quad (\text{T2 และ T4 นำกระแส}) \text{-----IV}$$

ในช่วงเวลา I (ที่เวลา $t_0 - t_1$) สวิตช์ T_1 และ T_2 ได้รับสัญญาณควบคุมสวิตช์ทั้งสองตัวนำกระแสแรงดันเอาต์พุต V_o มีค่าบวกเท่ากับแหล่งจ่าย V_s ในขณะที่ i_a มีค่าขึ้นเรื่อยๆ จนถึงที่เวลา II ($t_1 - t_2$) T_2 ไม่มีสัญญาณควบคุม T_2 ถูก turn off ดังนั้นกระแสอาร์เมเจอร์จึงไหลผ่าน T_1 และ D_3 แทนแรงดันที่ขั้วมอเตอร์มีค่าเป็นศูนย์ i_a มีค่าลดลง

ในช่วงเวลา III ($t_2 - t_3$) สวิตช์ T_2 ถูก turn on อีกครั้ง ตอนนี้ $V_a = V_s$ i_a ไหลผ่าน T_1 และ T_2 มีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้ง

ในช่วงเวลา IV ($t_3 - t_4$) T_1 ถูก turn off ดังนั้นจึงมีกระแสไหลในทิศทางเดิมผ่าน D_4 และ T_2 แทนแรงดันเอาต์พุตมีค่าเป็นศูนย์



รูปที่ 2 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสช่วง Forward motoring

- การทำงานแบบ Forward motoring ใน Quadrant ที่ 4

กำหนดให้ช่วงการทำงานแบ่งได้ 4 ช่วงคือ I, II, III และ IV ค่าแรงดันเอาต์พุตชั่วขณะเท่ากับ

$$V_o = 0 \quad \text{ที่เวลา } t_0 < t < t_1 \text{ (D1 และ T3 นำกระแส) -----I}$$

$$V_o = V_s \quad \text{ที่เวลา } t_1 < t < t_2 \text{ (D1 และ D2 นำกระแส) -----II}$$

$$V_o = 0 \quad \text{ที่เวลา } t_2 < t < t_3 \text{ (T4 และ D2 นำกระแส) -----III}$$

$$V_o = V_s \quad \text{ที่เวลา } t_3 < t < t_4 \text{ (D1 และ D2 นำกระแส) -----IV}$$

การทำงานของมอเตอร์ในช่วง Forward motoring แรงดันเอาต์พุตและกระแสอาร์เมเจอร์มีค่าเป็นบวก ส่วนการทำงานของมอเตอร์สามารถเปลี่ยนเป็น Forward regenerative เมื่อลดค่าวงรอบการทำงาน; Duty cycle ผลคือแรงดันเอาต์พุตที่เกิดจากการสวิตช์; V_o มีค่าน้อยกว่าแรงดันต้านกลับ; E_b ทำให้กระแส i_a มีค่าเป็นลบแรงบิดมีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางหมุนเดิม ความเร็วของมอเตอร์จึงลดลง

ในช่วงเวลา I ($t_0 - t_1$) สวิตช์ T_1 และ T_3 ได้รับสัญญาณควบคุม ขณะที่แรงดันต้านกลับมีค่าเป็นบวกมากกว่าแรงดันที่ขั้วมอเตอร์; V_o ทำให้ i_a ไหลมีค่าเป็นลบ (ไหลกลับทิศทาง) ในช่วงขณะนี้ i_a / ค่อยๆ เพิ่มขึ้น พลังงานที่สะสมในวงจรอาร์เมเจอร์มีค่าเพิ่มขึ้นสวิตช์ T_1 ไม่สามารถนำกระแสได้เนื่องจาก D_3 นำกระแสอยู่ i_a จึงไหลผ่าน T_3 และ D_1 แทน

ในช่วงเวลา II ($t_1 - t_2$) สวิตช์ T_1 และ T_2 ได้รับสัญญาณควบคุมแต่ไม่สามารถนำกระแสได้เนื่องจาก D_1 และ D_2 เริ่มนำกระแสอยู่ก่อนแรงดันเอาต์พุตมีค่าเป็นบวกเท่ากับ V_s กระแสมีค่าลดลงเรื่อยๆ

ในช่วงเวลา III ($t_2 - t_3$) สวิตช์ T_2 และ T_4 ได้รับสัญญาณควบคุมเนื่องจาก D_4 นำกระแสอยู่ ดังนั้น T_2 ไม่สามารถนำกระแสได้กระแสมีทิศทางไหลผ่าน D_2 และ T_4 / i_a / มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แรงดัน $V_o = 0$

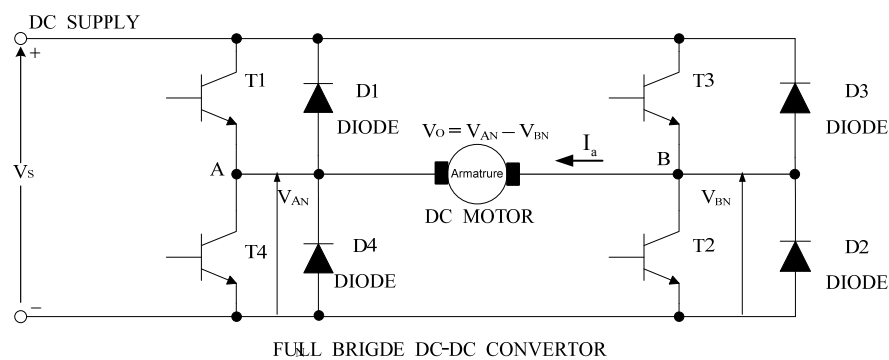
ในช่วงเวลา IV ($t_3 - t_4$) T_1 และ T_2 ได้รับสัญญาณควบคุมขณะที่ D_2 นำกระแสอยู่ ดังนั้น T_2 ไม่สามารถนำกระแสได้ กระแสจึงไหลผ่าน D_1 และ D_2 แรงดัน $V_o = V_s$

- การทำงานแบบ Reverse motoring ใน Quadrant ที่ 3

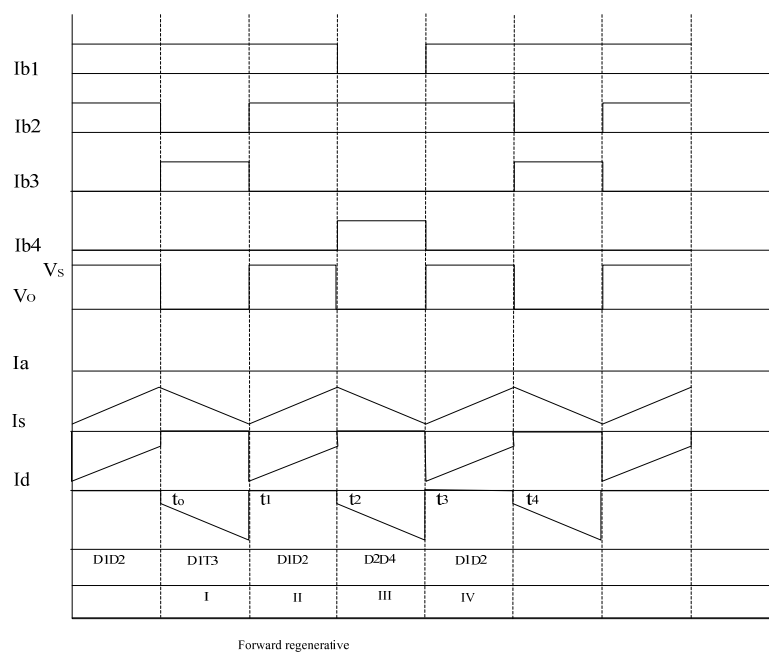
การทำงานมีลำดับการสวิตช์คล้ายกับแบบ Forward motoring แต่สวิตช์ T_3 และ T_4 จะทำงานแทนคู่ T_1 และ T_2

- การทำงานแบบ Reverse regenerative ใน Quadrant ที่ 2

การทำงานมีลำดับการสวิตช์คล้ายกับแบบ Forward regenerative แต่สวิตช์ T_3 และ T_4 จะทำงานแทนคู่ T_1 และ T_2



รูปที่ 3 วงจรฟลูบริดจ์ดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์เมื่อทำงานแบบ Reverse regenerative

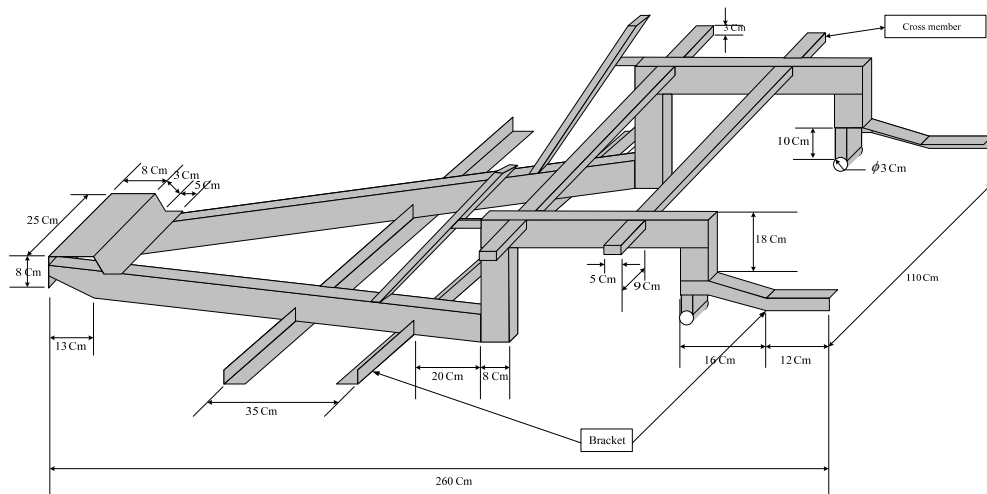


รูปที่ 4 รูปคลื่นของกระแสและแรงดันในช่วง Reverse regenerative

การออกแบบและการสร้าง

การออกแบบโครงสร้างรถ

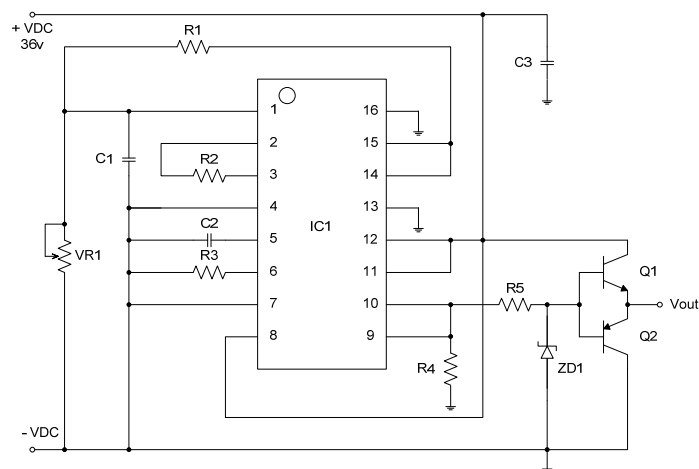
ลักษณะทั่วไปของโครงสร้างรถ โดยปกติทำขึ้นจากเหล็กกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า สองอันเชื่อม ประกอบกันทำให้เกิดโครงสร้างเป็นรูปกล่อง (Box Construction) และจะมีเหล็กขวาง (Cross member) ซึ่งใช้วัสดุอย่างเดียวกันเชื่อมติดหรือยึดให้โครงสร้างรถเกิดความแข็งแรงมากขึ้นและหลังโครงสร้างรถ จะมีแผ่นเหล็ก (Bracket) ยื่นออกมาเพื่อใช้เป็นตัวยึดติดกับชิ้นส่วนตัวถัง โครงสร้างรถทั้งหมดด้านหน้าจะแคบกว่าด้านหลังเสมอ การสร้างด้านหน้าแคบเพื่อให้เกิดการหันเลี้ยวได้ง่าย ส่วนด้านหลังกว้าง เพื่อรองรับตัวถังรถได้ดีขึ้น โครงสร้างของรถพลังไฟฟ้าที่ออกแบบแสดงดังรูปที่ 5



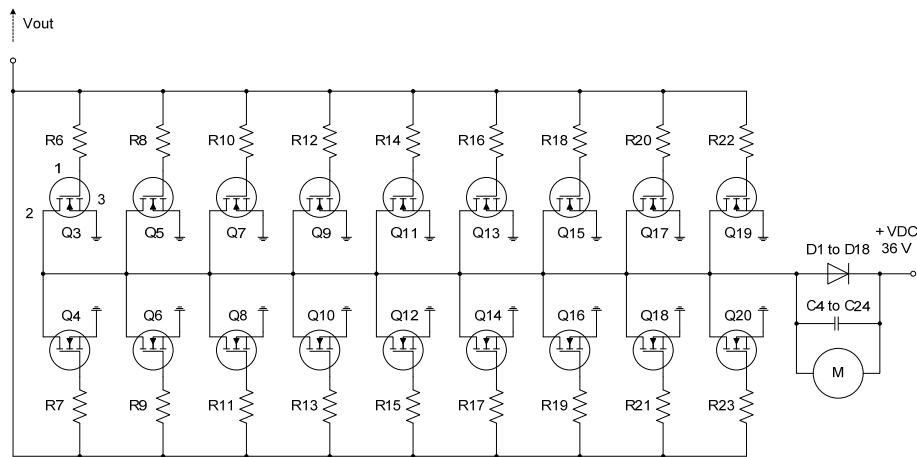
รูปที่ 5 แสดงตัวถังโครงสร้างของรถพลังไฟฟ้าที่ออกแบบ

วงจรขับ (Drive Circuits)

วงจรนี้เป็นวงจรที่ใช้หลักการควบคุมแบบ PWM โดย IC จะเป็นตัวสร้างสัญญาณพัลส์ ทริก ให้กับ T1 และ T2 เพื่อไป Drive ชุดวงจรขับมอสเฟตในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟตรงขนาด 36 V , 2 HP วงจรสร้างสัญญาณ (PWM) แสดงดังรูปที่ 6 และ วงจรขับมอสเฟสแสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 วงจรสร้างสัญญาณ PWM



รูปที่ 7 วงจรขับมอเตอร์

การคำนวณค่าต่างๆ ในวงจรสร้างสัญญาณ PWM

ลักษณะของวงจรสร้างสัญญาณพัลส์ PWM โดยได้กำหนดให้วงจรนี้มีค่าความถี่เท่ากับ 16 KHz โดยที่สามารถปรับค่าของความกว้างของพัลส์ (Duty Cycle) ได้จาก VR1 ความถี่ในการใช้งานเท่ากับ 16 kHz ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 2 คือ

$$f_{osc} \cong \frac{1.1}{R_T \times C_T} \quad (2)$$

เมื่อ $R_T = R_5, C_T = C_3$

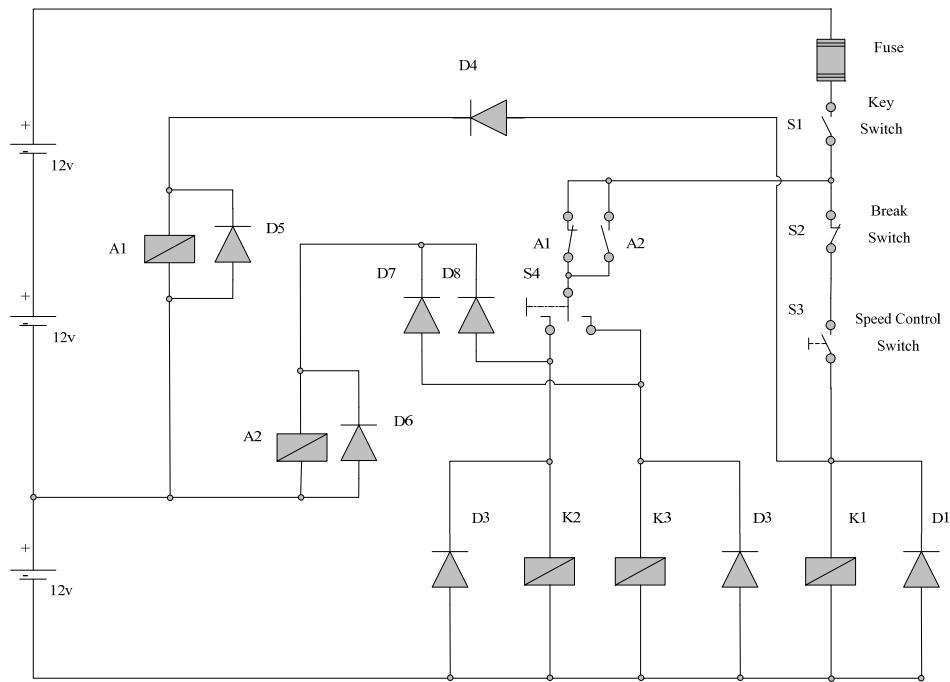
กำหนดค่าของ $C_T = C_3 = 0.68 \mu F$ และทำการหาค่าของ $R_T = R_5$ ดังนี้

$$R_T \cong \frac{1.1}{f_{osc} \times C_T} = \frac{1.1}{16 \text{ kHz} \times 0.68 \mu F} = 10.11 \text{ k}\Omega$$

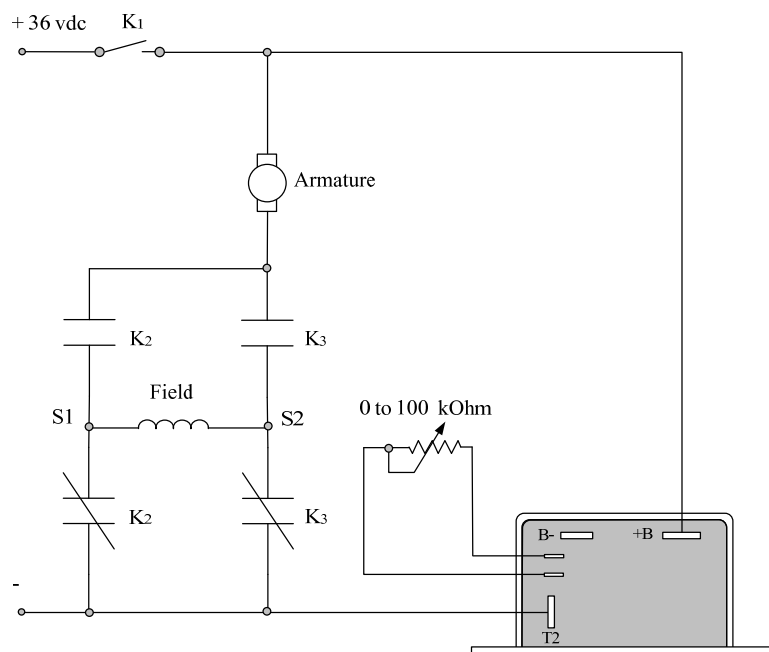
เลือกค่า 10 k Ω

อุปกรณ์ควบคุมการทำงานของมอเตอร์

ในวงจรนี้จะใช้ Foot Switch เป็นสวิตช์ในการเริ่มทำงานและยังเป็นตัวควบคุมความเร็วของมอเตอร์ ซึ่งเป็นต้นกำลังขับเคลื่อนโดยใช้ไฟฟ้าขนาดแรงดัน 24, 36 โวลต์ วงจรควบคุมแสดงดังรูปที่ 8(a) และวงจรขับแสดงดังรูปที่ 8(b) จากวงจรควบคุม (a) เมื่อทำการปิดวงจรด้วยสวิตช์ S1 (สวิตช์กุญแจ) ยกสวิตช์ S4 เพื่อเลือกทิศทางการเคลื่อนที่ (K2 เพื่อเดินหน้าและ K3 เพื่อถอยหลัง) ไม่เลือกเดินหน้าหรือถอยหลังรีเลย์ A2 จะทำงานทำให้คอนแทค A2 ต่อวงจรรอบ ในกรณีที่เลือกการเคลื่อนที่เดินหน้ารีเลย์ K2 จะทำงานทำให้คอนแทค K2 ทั้งสองคอนแทคในวงจรขับ (b) เปลี่ยนสถานะทำให้ขดลวดฟิลด์ต่ออนุกรมเข้ากับอาร์เมเจอร์มอเตอร์พร้อมทำงาน เมื่อเหยียบคันเร่งสวิตช์ S2 ต่อวงจรทำให้รีเลย์ K1 และ A1 ทำงาน ทำให้คอนแทค K1 ในวงจรขับ (b) ต่อวงจร คอนแทคของรีเลย์ A1 ติดวงจรแต่ในตอนนี้นักคอนแทคของ A2 ทำการต่อวงจรแทนอยู่แล้วรถจึงสามารถเคลื่อนที่ไปข้างหน้าได้



(a) วงจรควบคุม



(b) วงจรขับ

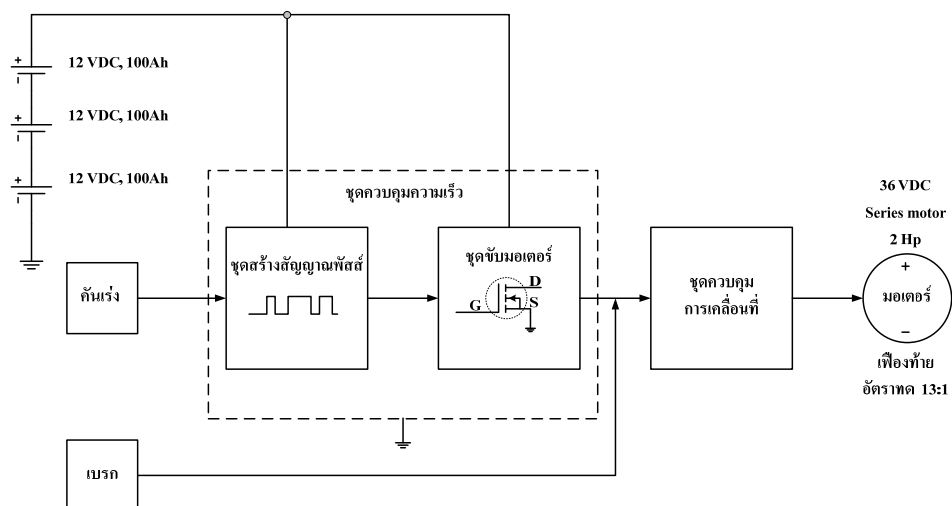
รูปที่ 8 วงจรควบคุมและการเคลื่อนที่ของรถ

เช่นเดียวกัน ในกรณีที่เคลื่อนถอยหลังการทำงานของรีเลย์ต่างจะคล้ายกันแต่เปลี่ยนตัวรีเลย์ที่ทำงานจาก K2 เป็น K3 จากวงจรจะเห็นว่าจะต้องทำการเลือกทิศทางการเคลื่อนที่ก่อนที่จะเหยียบคันเร่ง ถ้าทำการเหยียบคันเร่งก่อนแล้วจึงเลือกทิศทางการเคลื่อนที่เนื่องจากรีเลย์ A1 ทำงานตัดวงจรก่อนที่รีเลย์ A2 จะต่อวงจร เป็นป้องกันไม่ให้มอเตอร์เกิดการกระชากเพราะต้องถอยคันเร่งก่อนทุกครั้ง

ผลการทดสอบ

การทดสอบจะเป็นการจับสัญญาณรูปคลื่นที่ได้จากวงจรควบคุมความเร็วของมอเตอร์ที่สร้างขึ้นที่ระดับแรงดันต่างๆ แล้วนำมาคำนวณความถี่เปรียบเทียบกับความถี่ที่ได้กำหนดไว้ เปรียบเทียบอัตราสิ้นเปลืองพลังงานเทียบกับรถที่ใช้น้ำมันและรถไฟฟ้าจากสถาบันอื่น

บล็อกไดอะแกรมของการทดสอบ



รูปที่ 9 บล็อกไดอะแกรมของการทดสอบ

การทดสอบหาอัตราการสิ้นเปลืองของรถยนต์กับรถพลังไฟฟ้าต้นแบบ

การเปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองของรถยนต์กับรถพลังไฟฟ้า แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบอัตราสิ้นเปลืองพลังงานของรถยนต์กับรถพลังไฟฟ้า

ประเภทรถ	ระยะทาง (กม.)	ความเร็วที่ได้ (Km/Hr)	ค่าใช้จ่าย (บาท)	อัตราสิ้นเปลือง (บาท)
รถยนต์ (น้ำมันเชื้อเพลิง)	15 กม. / ลิตร	60 Km / Hr	30 บาท *	2 บาท / 1 กิโลเมตร
รถพลังไฟฟ้า (แบตเตอรี่)	25 กม. / การชาร์จ 1 ครั้ง	25 Km / Hr	15 บาท **	60 สตางค์ / 1 กิโลเมตร

หมายเหตุ

* คิดที่ราคาน้ำมันเบนซิน 91 ลิตรละ 30 บาท

** คิดที่การชาร์จ 1 ครั้งใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 5 หน่วยๆละ 3 บาท

การทดสอบระบบควบคุมความเร็วโดยวัดไฟที่ออกผ่านการควบคุมจะได้แรงดันที่ทดสอบต่อกับมอเตอร์และแรงดันจะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางที่แสดงลักษณะกราฟ รูปที่ 4.14

ตารางที่ 1 แสดงค่าแรงดันและระยะทางเคลื่อนที่

แรงดัน (V)	ระยะทาง (กิโลเมตร)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
27	4.51	4.36	4.41	4.43
28	8.49	8.52	8.53	8.51
29	12.52	12.37	12.51	12.47
30	16.11	15.80	16.37	16.09
31	19.06	19.14	19.48	19.23
32	22.03	21.79	21.93	21.92
33	24.11	23.96	23.82	23.96
34	25.50	25.50	25.26	25.42
35	26.38	26.46	26.47	26.44
36	26.84	27.00	26.68	26.84

รถพลังไฟฟ้าต้นแบบโดยใช้แรงดันขับเคลื่อนที่ 36V, 100Ah ขนาดของมอเตอร์กระแสตรง 2 Hp แสดงดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 รถพลังไฟฟ้าต้นแบบ

บทสรุป

ผลการทดสอบระบบพลังงานไฟฟ้าต้นแบบสามารถทำงานได้ดีเยี่ยม อุปกรณ์ทุกชิ้นส่วนสามารถทำงานได้ดี มีความแข็งแรง ทนทาน สามารถรับภาระงานไม่เกินพิกัดได้ และสมรรถนะในการใช้งาน ทดเทียมรถกอล์ฟที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ในขณะที่ต้นทุนการสร้างของเราลดลง อีกทั้งปัจจุบันนี้มีการรณรงค์ในการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมและมลพิษ รถพลังงานไฟฟ้าก็เข้ามามีบทบาทมากขึ้น เพราะสามารถลดเสียงดัง และมลพิษได้อย่างดี ถ้าเรามีการออกแบบให้มีการประหยัดพลังงานได้มากกว่าที่เป็นอยู่ ซึ่งจะเป็นการช่วยประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

เอกสารอ้างอิง

ศุภชัย สุรินทร์วงศ์. “มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.” กรุงเทพมหานคร : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2535

ศิวะ หงษ์นภา. “หลักการและการประยุกต์ใช้งานดีซีไดรฟ์.” กรุงเทพมหานคร : บริษัทกู๊ดวิลล์ไดเรคชั่น จำกัด, 2547

มงคล ทองสงคราม. “อิเล็กทรอนิกส์กำลัง.” พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร : ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ.พรินติ้ง, 2540