บทที่ 3

การออกแบบวงจรสร้างสัญญาณ PWM และ วงจรขับนำสวิตช์

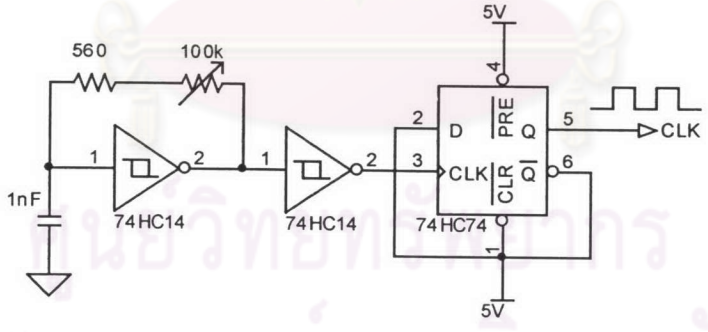
เนื่องจากวงจรขยายแบบวิธีสวิตช์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ ประกอบด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำ 80 kHz และ อินเวอร์เตอร์ความถี่สูง 300 kHz ตามลำดับ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องออกแบบวงจรสร้างสัญญาณ PWM และ วงจรขับนำสวิตช์ ของอินเวอร์เตอร์ทั้งสองชุด ดังต่อไปนี้

3.1 การออกแบบวงจรสร้างสัญญาณ PWM ความถี่ 80 kHz

วงจรนี้ประกอบด้วยวงจรย่อย 3 วงจร คือ วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา (CLOCK) วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม(TRIANGLE GENERATOR) และวงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์ (MODULATOR)

3.1.1 วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา (CLOCK)

วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา ใช้วงจรออสซิเลเตอร์แบบชมิตต์ทริกเกอร์ (Schmitt Trigger Oscillator) สร้างสัญญาณสี่เหลี่ยมความถี่ประมาณ 160 kHz โดยสัญญาณสี่เหลี่ยมถูกต่อผ่านบัฟเฟอร์ (74HC14) จากนั้นก็ใช้ D FLIP-FLOP (74HC74) เพื่อหารความถี่ลงมาสองเท่า (80 kHz) และปรับสัณฐานของสัญญาณนาฬิกา (CLK) ให้มีความสมมาตร แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา

วงจรออสซิเลเตอร์แบบชมิตต์ทริกเกอร์นั้นใช้หลักการฮีสเทอเรซีส (Hysteresis) ซึ่งสมการที่ใช้ในการประมาณความถี่ของสัญญาณนาฬิกา แสดงดังสมการที่ 3.1 เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการสะสมประจุและคายประจุมีค่าไม่เท่ากัน แสดงดังสมการที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ ดังนั้นจึงใช้วงจร D FLIP-FLOP ซึ่งทำงานที่ขอบขาขึ้น ทำให้สัญญาณนาฬิกามีความสมมาตร

$$f \approx \frac{1}{RC \ln \frac{V_{T+}\left(V_{CC} - V_{T-}\right)}{V_{T-}\left(V_{CC} - V_{T+}\right)}} \tag{3.1}$$

$$t_1 \approx RC \ln \frac{V_{T+}}{V_{T-}} \tag{3.2}$$

$$t_2 \approx RC \ln \frac{V_{CC} - V_{T-}}{V_{CC} - V_{T+}} \tag{3.3}$$

โดยที่ V_{T+} คือ แรงดันเทรชโฮลด์ด้านบน (Upper Threshold Voltage)

V_{T-} คือ แรงดันเทรชโฮลด์ด้านล่าง (Upper Threshold Voltage)

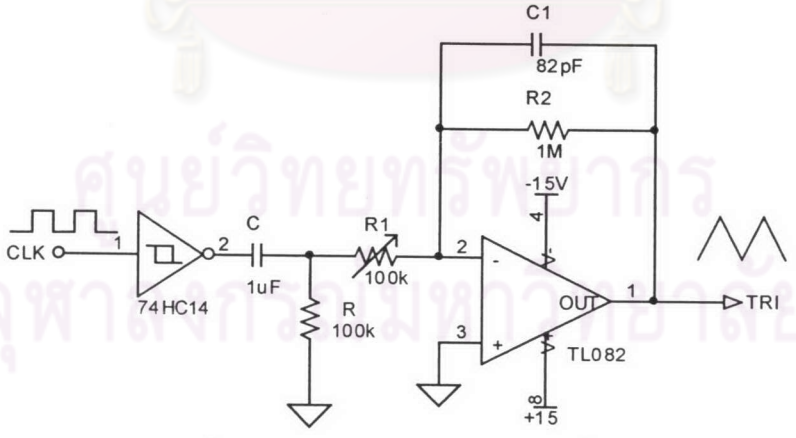
V_{CC} คือ แรงดันของแหล่งจ่าย (Supply Voltage)

t_1 คือ เวลาในการสะสมประจุ

t_2 คือ เวลาในการคายประจุ

3.1.2 วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม (TRIANGLE GENERATOR)

วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม ทำหน้าที่สร้างสัญญาณสามเหลี่ยมเพื่อใช้ในการมอดูเลต โดยสัญญาณนาฬิกา (CLK) ถูกต่อผ่านบัฟเฟอร์ (74HC14) จากนั้นวงจรกรองผ่านสูง (High-Pass Filter) ทำหน้าที่กรององค์ประกอบไฟตรงออก ซึ่งสัญญาณสี่เหลี่ยมที่ได้เมื่อผ่านวงจรอินทิเกรท (TL082) ก็จะได้สัญญาณสามเหลี่ยม(TRI) แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม

เนื่องจากสัญญาณสามเหลี่ยมที่เราต้องการจะต้องเป็นบวกและลบสลับกัน ดังนั้นจึงต้องใช้วงจรกรองผ่านสูง กรององค์ประกอบไฟตรงออก เพื่อให้สัญญาณนาฬิกามีค่าเป็นบวกและลบสลับ

กันด้วย ก่อนที่จะนำไปผ่านวงจรอินทิเกรท สมการที่ใช้ในวงจรกรองผ่านสูงแสดงดังสมการที่ 3.4 และสมการที่ใช้ในวงจรอินทิเกรทแสดงดังสมการที่ 3.5 , 3.6 และ 3.7 ตามลำดับ

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \tag{3.4}$$

$$V_{out} = \frac{-1}{R_1 C_1}\int_0^t V_{in}\,dt \tag{3.5}$$

จากสมการที่ 3.5 จะได้

$$R_1 C_1 = -V_{in}\frac{\Delta t}{\Delta V_{out}}$$

$$= -V_{in}\frac{T}{2}\frac{1}{V_{tri,pp}} \tag{3.6}$$

จากสมการที่ 3.6 เลือกค่า C และ ค่าแอมปลิจูดของสัญญาณสามเหลี่ยม จะได้ค่า R_1

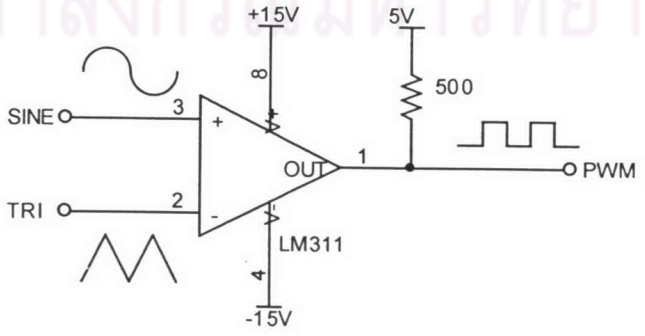
เนื่องจากค่า R_2 ที่รวมอยู่ในวงจรอินทิเกรท จะทำให้วงจรอินทิเกรทเป็นวงจรกรองผ่านต่ำอันดับที่ 1 (First Order) ซึ่งมีความถี่หักมุม (Corner Frequency) แสดงดังสมการที่ 3.7

$$\omega_0 = \frac{1}{R_2 C_1} \tag{3.7}$$

ความถี่หักมุม ω_0 จะต้องน้อยกว่าความถี่สวิตช์หรือความถี่ของสัญญาณสามเหลี่ยม อย่างน้อย 10 เท่า จากสมการที่ 3.6 เรารู้ค่า C_1 ดังนั้นจะได้ค่า R_2

3.1.3 วงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์ (MODULATOR)

วงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์ ใช้วงจรเปรียบเทียบหรือคอมพาราเตอร์(LM311) ทำหน้าที่เปรียบเทียบสัญญาณอ้างอิง (V_R) กับ สัญญาณสามเหลี่ยม (TRI) เพื่อสร้างสัญญาณ PWM ความถี่ 80 kHz แสดงดังรูปที่ 3.3

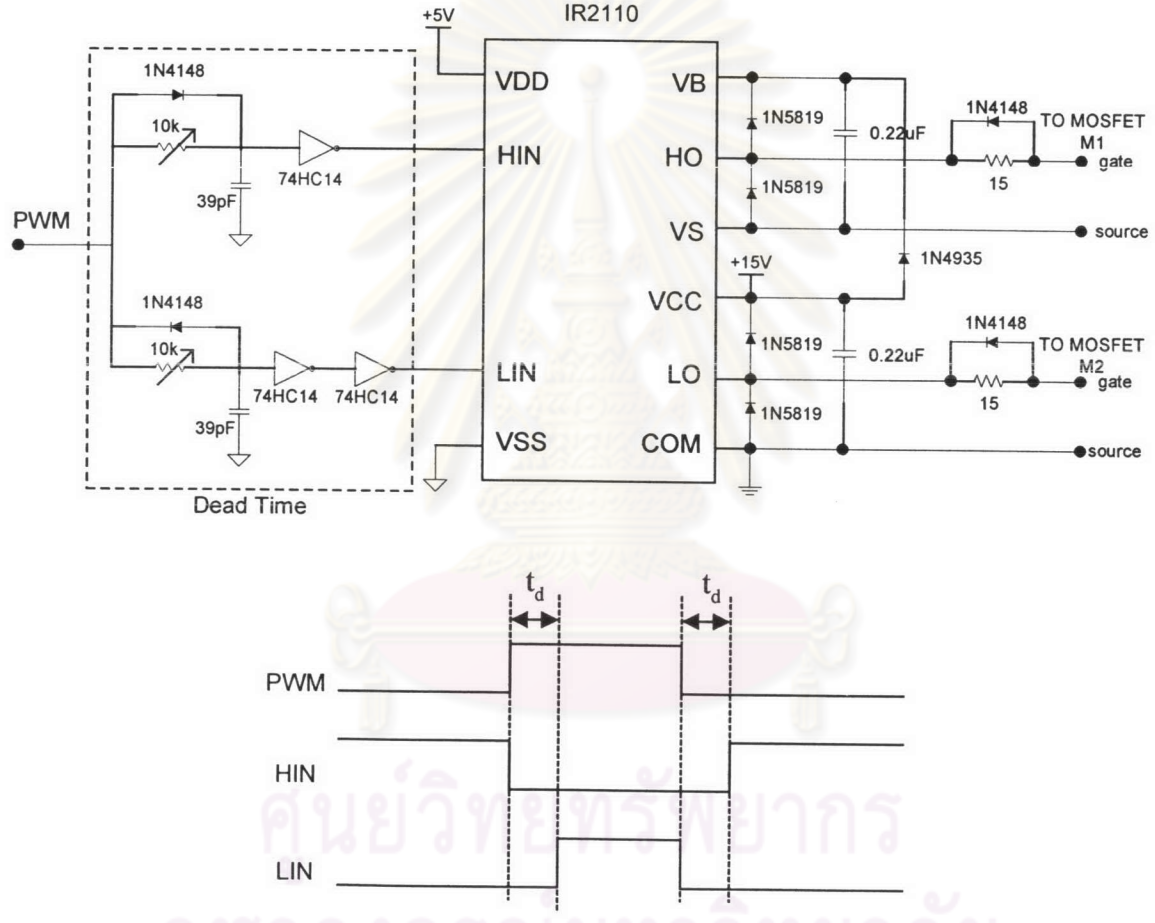


รูปที่ 3.3 วงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์

เนื่องจากวงจรเปรียบเทียบหรือคอมพาราเตอร์ (LM311) เป็นวงจรที่ทางด้านออก (Output) เป็นแบบ Open Collector จึงต้องต่อแหล่งจ่ายภายนอกและความต้านทานเพิ่มซึ่งเรียกว่า Pullup Resistor

3.2 วงจรขับนำสวิตช์

วงจรขับนำสวิตช์ PWM ประกอบด้วย วงจรสร้างเวลาพัก (Dead Time) และ วงจรขับนำเกต (Gate Drive) แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 วงจรขับนำสวิตช์ PWM

วงจรสร้างเวลาพัก ทำหน้าที่ในการสร้างเวลาพัก และสร้างสัญญาณขับนำ HIN และ LIN ที่ทำงานเป็นคู่ประกอบกัน

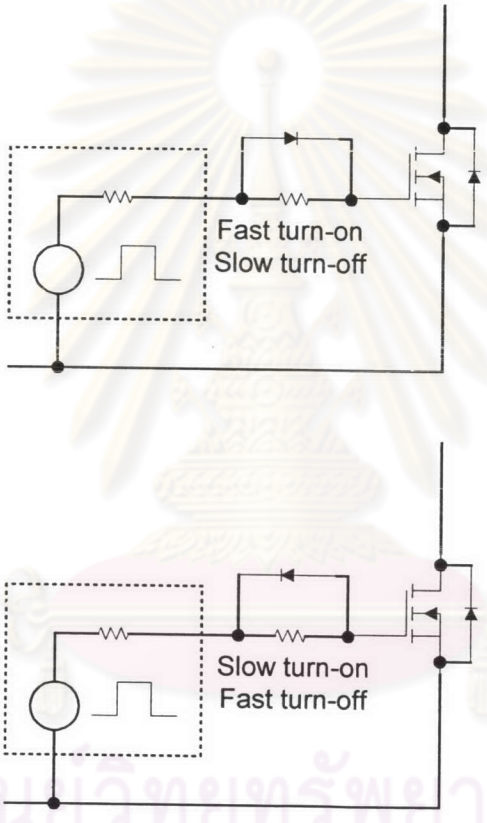
วงจรขับนำใช้วงจรประมวลเบอร์ IR2110 ซึ่งเป็นวงจรขับนำสำหรับสวิตช์กึ่งบริดจ์ สามารถใช้งานได้ที่ความถี่สูง สัญญาณขับนำมีความสมมาตร และสามารถจ่ายกระแสออกได้สูง โดยสวิตช์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ด้านบนในกิ่งอินเวอร์เตอร์ (M1) ใช้หลักการบูทสแตรป (Boot Strap) ทำให้ไม่จำเป็นต้องต่อไฟเลี้ยงเพิ่มเติม

3.3 วงจรขับนำเกตแบบไม่สมมาตร (Asymmetric Gate Drive Circuit)

ความแตกต่างของเวลานำกระแส (Turn On) และ เวลาหยุดนำกระแส (Turn Off) สามารถทำได้โดยการบายพาส (Bypassing) ความต้านทานเกตด้วยไดโอด แสดงดังรูปที่ 3.5



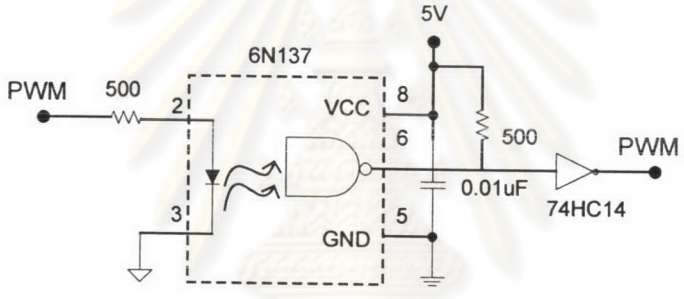
รูปที่ 3.5 วงจรขับนำเกตแบบไม่สมมาตร

วงจรขับนำเกตแบบไม่สมมาตร ถูกใช้เมื่อมอสเฟต (MOSFET) ควบคุมโหลดที่เป็นตัวเหนี่ยวนำ (Inductive Load) การนำกระแสที่ช้า (Slow Turn On) เพื่อที่จะลดกระแสเสิร์จ(Surge Current) ที่เกิดขึ้นในมอสเฟตที่ถูกกำหนดโดยการประจุฟื้นตัวย้อนกลับ (Reverse Recovery Charge) ของไดโอดหมุนเปล่า (Free-Wheeling Diode) และ การหยุดนำกระแสที่เร็ว (Fast Turn Off) เพื่อที่จะลดเวลาหยุดนำกระแส และ ความสูญเสียจากการสวิตช์ (Switching Loss) ให้มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งได้นำหลักการนี้ไปใช้กับวงจรขับนำเกตดังแสดงในรูปที่ 3.4

3.4 การออกแบบวงจรสร้างสัญญาณ PWM ความถี่ 300 kHz

วงจรนี้ประกอบด้วยวงจรย่อย 3 วงจร คือ วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา (CLOCK) วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม(TRIANGLE GENERATOR) และวงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์ (MODULATOR) ซึ่งวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาและวงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม เหมือนกับวงจรสร้างสัญญาณ PWM 80 kHz เพียงแค่ปรับเปลี่ยนค่าความต้านทานที่ใช้ในวงจรออสซิเลเตอร์แบบชมิตต์ทริกเกอร์และวงจรอินทิเกรท

ในส่วนของวงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์ สัญญาณ PWM 300 kHz ที่ได้จะนำไปเข้าวงจรเชื่อมโยงผ่านแสง (Optocoupler) แสดงดังรูปที่ 3.6 เพื่อแยกวงจรระหว่างวงจรสร้างสัญญาณ PWM กับ วงจรขับนำสวิตช์ออกจากกัน ก่อนที่จะส่งไปขับนำสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง



รูปที่ 3.6 วงจรเชื่อมโยงผ่านแสง (Optocoupler)

เนื่องจากวงจรเชื่อมโยงผ่านแสง (6N137) สามารถทำงานได้ที่ความถี่สูง จึงได้นำมาใช้แยกกราวด์ของสัญญาณ PWM ความถี่ 300 kHz ที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบ (LM311) ออกจากกราวด์ของวงจรขับนำสวิตช์ ซึ่งเป็นกราวด์เดียวกับกราวด์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง 300 kHz จากรูปที่ 3.6 จะเห็นได้ว่า สัญญาณด้านออกของวงจรเชื่อมโยงผ่านแสง จะมีเฟสตรงกันข้ามกับสัญญาณด้านเข้า ดังนั้นจึงนำมาต่อผ่านบัฟเฟอร์ (74HC14) เพื่อกลับเฟสของสัญญาณให้มีเฟสเดียวสัญญาณด้านเข้าของวงจรเชื่อมโยงผ่านแสง

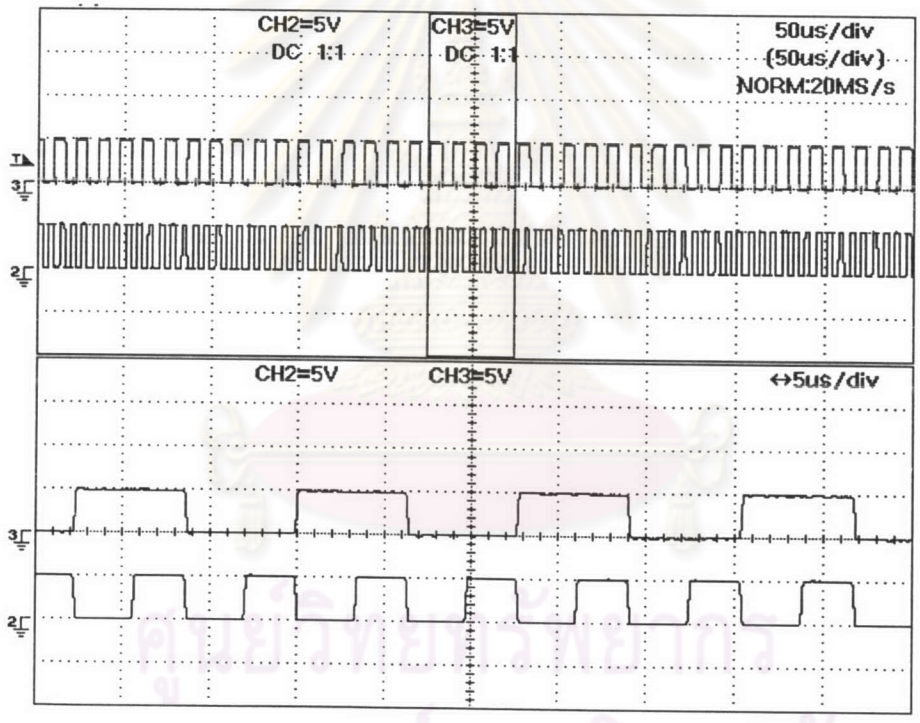
3.5 ผลการทดลอง

เมื่อนำวงจรขับนำสวิตช์ที่ได้ออกแบบไว้มาทำการทดลองสร้างวงจร เพื่อทดสอบผลการทำงานในแต่ละส่วน ผลการทดสอบในแต่ละส่วนแสดงดังต่อไปนี้

3.5.1 วงจรสร้างสัญญาณ PWM ความถี่ 80 kHz

3.5.1.1 วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา (CLOCK)

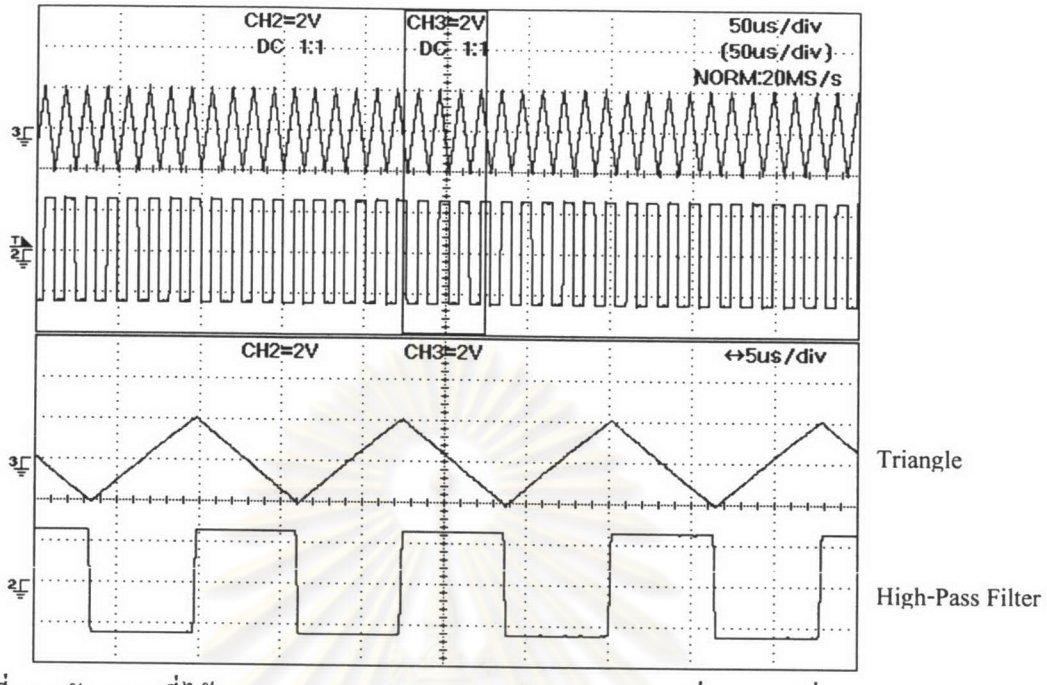
รูปที่ 3.7 แสดงสัญญาณนาฬิกาที่ได้จากวงจรออสซิเลเตอร์(74HC14) ความถี่160 kHz และสัญญาณนาฬิกาที่ได้จากวงจร D FLIP-FLOP (74HC74) ความถี่ 80 kHz



รูปที่ 3.7 สัญญาณนาฬิกาความถี่ 80 kHz และ 160 kHz

3.5.1.2 วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม (TRIANGLE GENERATOR)

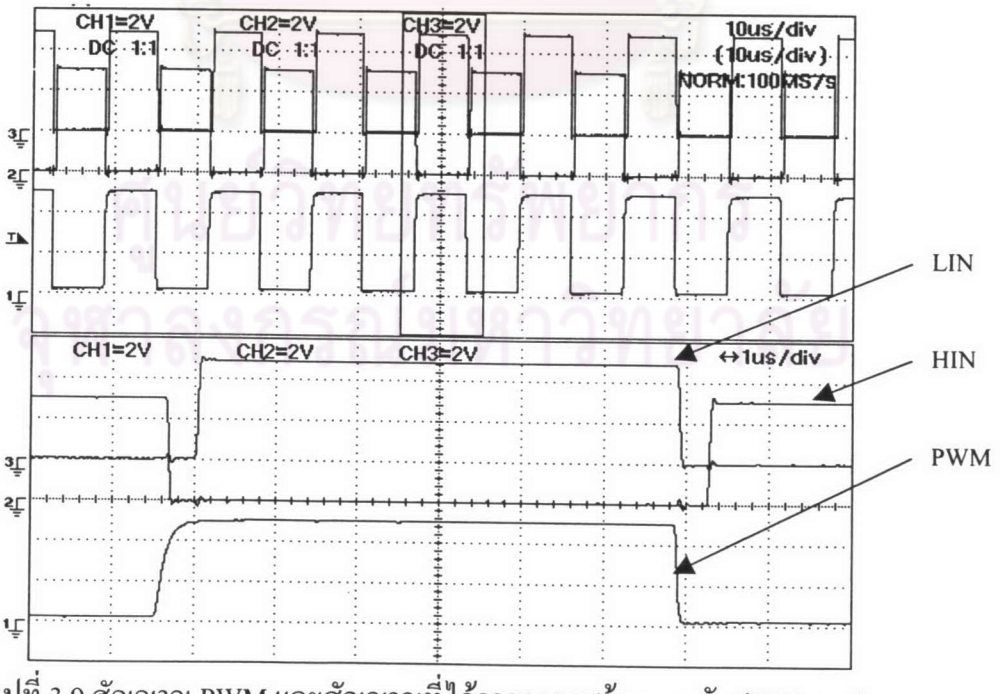
รูปที่ 3.8 แสดงสัญญาณนาฬิกาที่ได้รับการกรององค์ประกอบไฟตรงออก โดยวงจรกรองผ่านสูง (High-Pass Filter) และ สัญญาณสามเหลี่ยม (Triangle) ความถี่ 80 kHz ที่ได้จากวงจรอินทิเกรท



รูปที่ 3.8 สัญญาณที่ได้จากวงจรกรองผ่านสูงและสัญญาณสามเหลี่ยมความถี่ 80 kHz

3.5.1.3 วงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์และวงจรสร้างเวลาพัก (Dead Time)

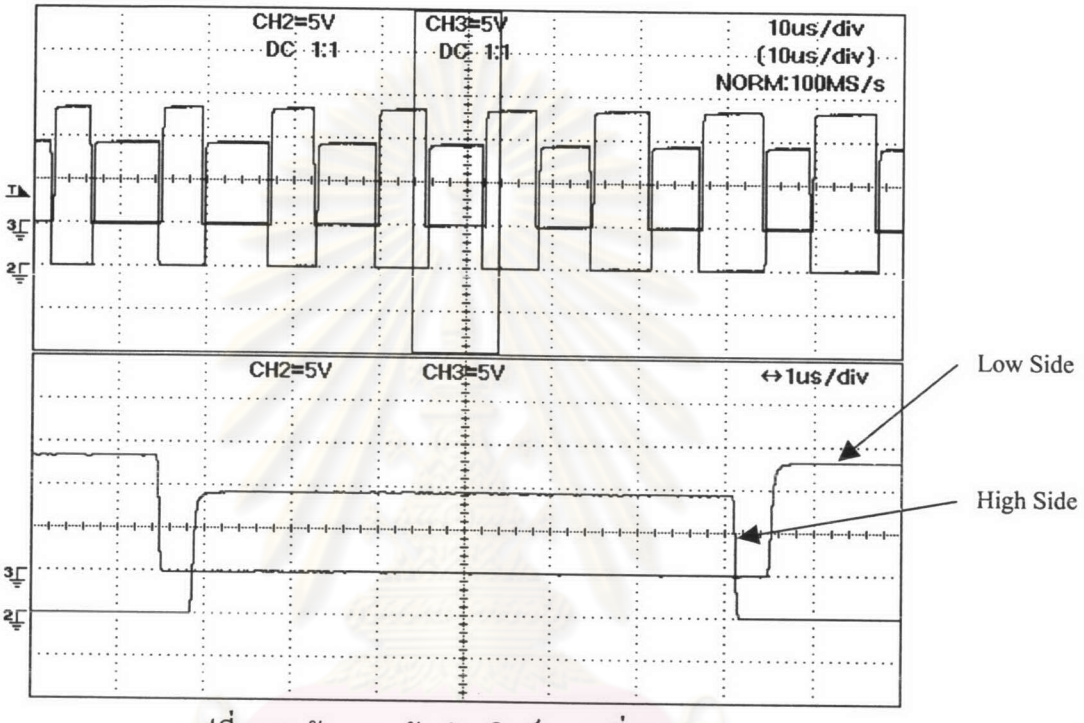
รูปที่ 3.9 แสดงสัญญาณ PWM ที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบ (LM311) และ สัญญาณที่ได้จากวงจรสร้างเวลาพัก (HIN,LIN) ก่อนที่จะเข้าไอซีขับนำ (IR2110)



รูปที่ 3.9 สัญญาณ PWM และสัญญาณที่ได้จากวงจรสร้างเวลาพัก (HIN,LIN)

3.5.1.4 วงจรขับนำสวิตช์

รูปที่ 3.10 แสดงสัญญาณขับนำสวิตช์มอสเฟต (Gate,Source)ของไอซีขับนำ (IR2110) ที่ใช้ขับนำสวิตช์ด้านบน และ ด้านล่าง (High Side,Low Side) ของอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ ความถี่ 80 kHz

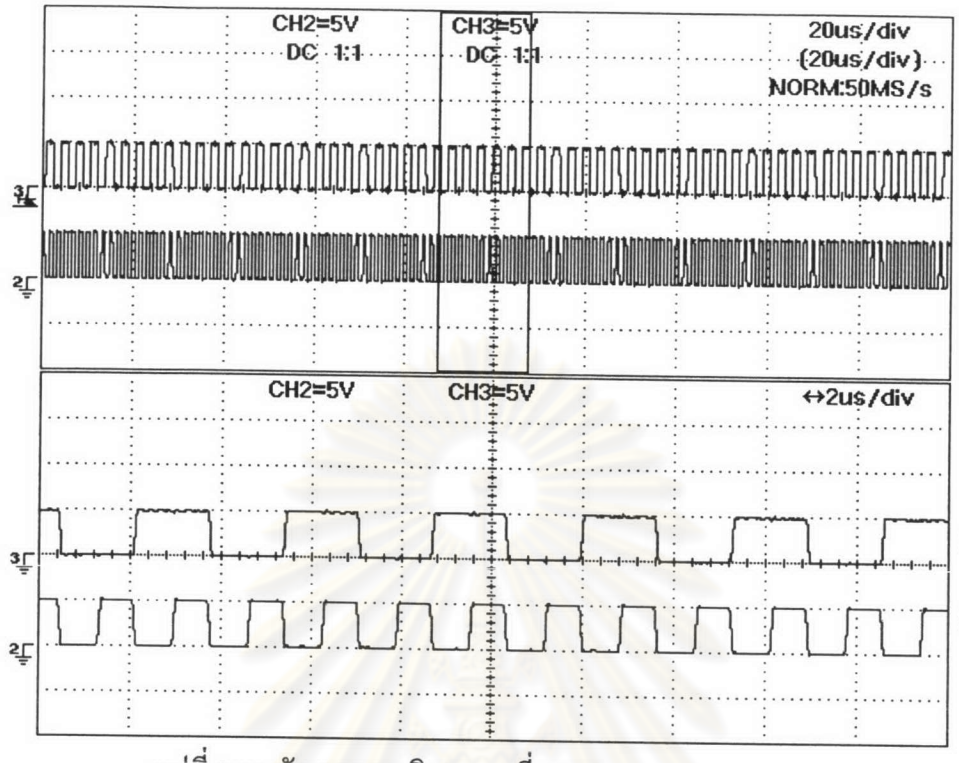


รูปที่ 3.10 สัญญาณขับนำสวิตช์ ความถี่ 80 kHz

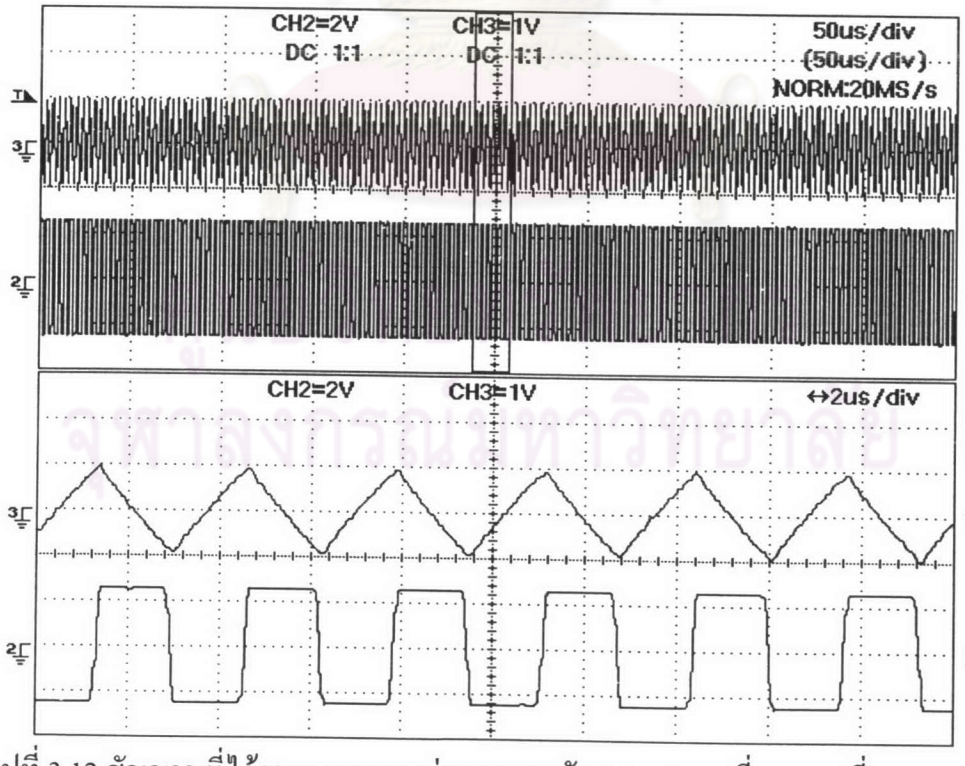
3.5.2 วงจรสร้างสัญญาณ PWM ความถี่ 300 kHz

ผลการทดลองประกอบด้วยสัญญาณที่ได้จากวงจรในส่วนต่างๆ 5 ส่วนดังต่อไปนี้

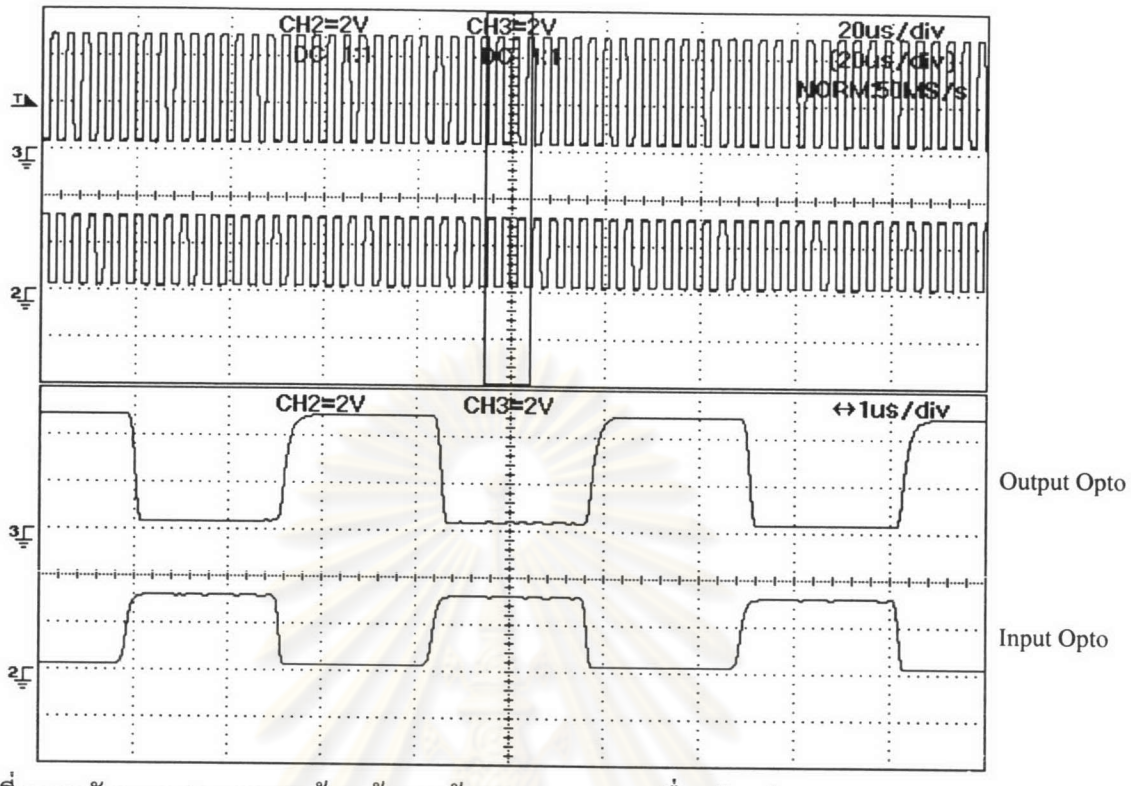
1. สัญญาณนาฬิกา(Clock)ความถี่ 600 kHz และ300 kHz ที่ได้จากวงจรออสซิเลเตอร์ และวงจร D Flip-Flop ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 3.11
2. สัญญาณที่ได้จากวงจรกรองผ่านสูง และ สัญญาณสามเหลี่ยม (Triangle) ความถี่ 300 kHz ที่ได้จากวงจรอินทิเกรท แสดงดังรูปที่ 3.12
3. สัญญาณ PWM ทางด้านเข้า (Input) และ ด้านออก (Output) ของวงจรเชื่อมโยงผ่านแสง (Optocoupler) แสดงดังรูปที่ 3.13
4. สัญญาณ PWM ที่ได้จากวงจรเชื่อมโยงผ่านแสงและสัญญาณที่จากวงจรสร้างเวลาพักแสดงดังรูปที่ 3.14
5. สัญญาณขับนำสวิตช์ที่ได้จากไอซีขับนำ(IR2110) แสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.11 สัญญาณนาฬิกาความถี่ 300 kHz และ 600 kHz

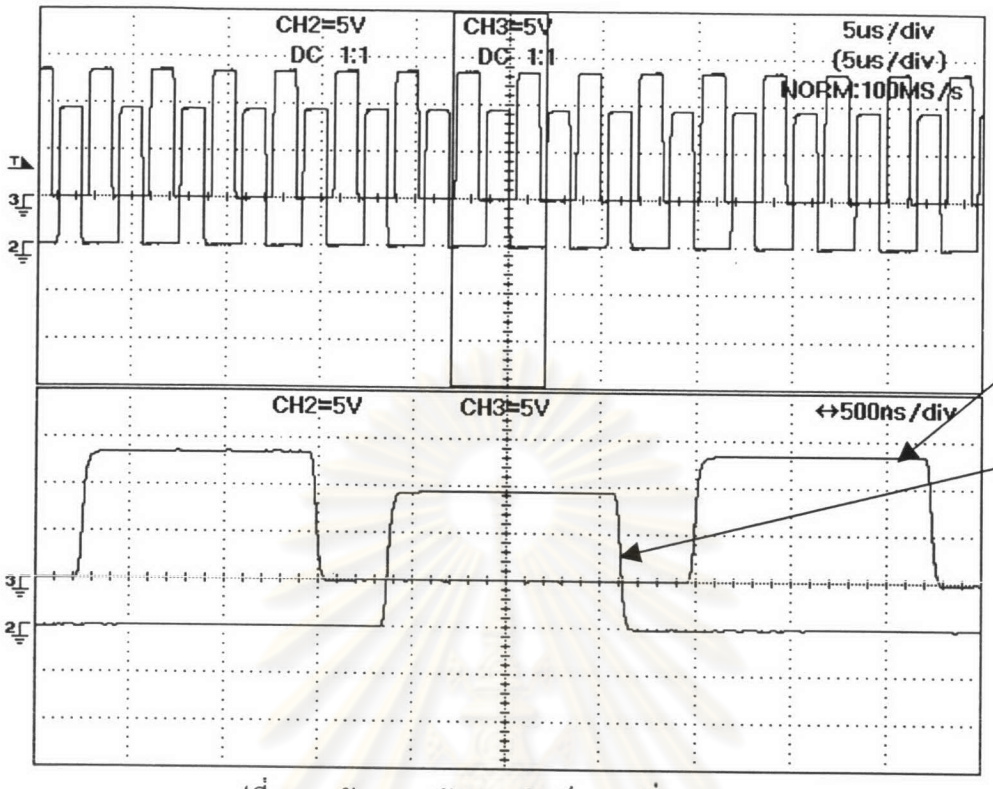


รูปที่ 3.12 สัญญาณที่ได้จากวงจรกรองผ่านสูงและสัญญาณสามเหลี่ยมความถี่ 300 kHz



รูปที่ 3.13 สัญญาณ PWM ทางด้านเข้าและด้านออกของวงจรเชื่อมโยงผ่านแสง (Optocoupler)

รูปที่ 3.14 สัญญาณ PWM ที่ได้จาก Optocoupler และสัญญาณที่ได้จากวงจรสร้างเวลาพัก (HIN,LIN)



รูปที่ 3.15 สัญญาณขับนำสวิตช์ ความถี่ 300 kHz

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย