

บทที่ 5

ผลการทดลอง

ผลการทดลองของวงจรอินเวอร์เตอร์ควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆตามชนิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งจะประกอบไปด้วย

5.1 ผลการทดลองมอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับแบบ 3 เฟส ซึ่งจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ

ก) ส่วนของสัญญาณทางเวลา และสัญญาณทางความถี่ ภายในอินเวอร์เตอร์ ที่ทำการวัดด้วย Digital Storage Scope ยี่ห้อ Tektronix รุ่น TDS220

ข) ส่วนของผลการทดสอบอินเวอร์เตอร์กับภาระโหลดที่เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 1 แรงม้า ที่มีการจ่ายภาระทางกล ด้วยชุดทดสอบยี่ห้อ SIEMENS รวมทั้งประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ และประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อมีภาระทางกลในแต่ละย่านของความถี่หลักมูล

5.2 ผลการทดลองมอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับแบบ 1 เฟส ซึ่งทำการทดลองในเฉพาะ ส่วนของสัญญาณทางเวลาและสัญญาณทางความถี่ ของชุดอินเวอร์เตอร์ โดยทำการวัดด้วย Digital Storage Scope ยี่ห้อ Tektronix รุ่น TDS220



รูปที่ 5.1 เครื่องมือวัดสัญญาณ Digital Storage Scope ยี่ห้อ Tektronix รุ่น TDS220

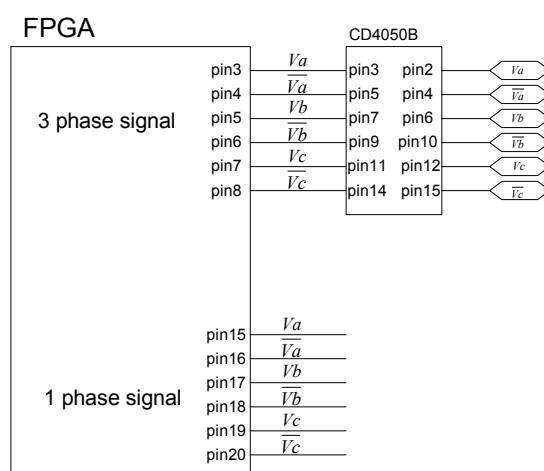
5.1 ผลการทดลองมอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับแบบ 3 เฟส

5.1.1 ผลการทดลองในส่วนของสัญญาณทางเวลา และสัญญาณความถี่ของอินเวอร์เตอร์ สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

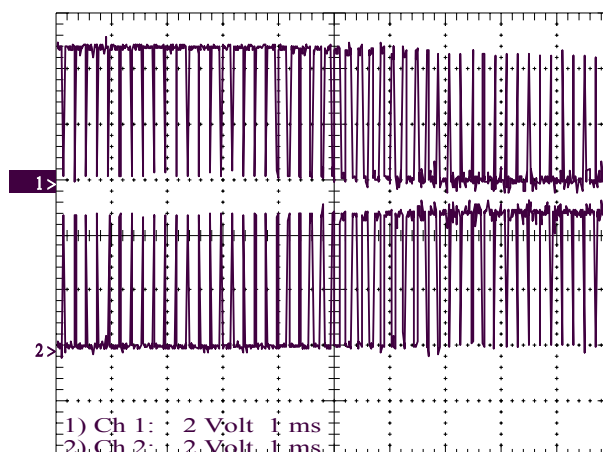
ผลการทดลองจะประกอบไปด้วยสัญญาณ SVM PWM ที่ได้จาก FPGA โดยแปลงระดับแรงดันของสัญญาณจาก 3.3V เป็นระดับ 5V โดยใช้ IC CD4050B โดยเป็นสัญญาณ SVM PWM แรงดันเฟส V_a, V_b, V_c และสัญญาณตรงกันข้ามเฟส $\overline{V_a}, \overline{V_b}, \overline{V_c}$ โดยสัญญาณ V_a, V_b, V_c ควบคุมสวิตช์ IGBT Q_1, Q_3, Q_5 ตามลำดับ และสัญญาณ $\overline{V_a}, \overline{V_b}, \overline{V_c}$ ควบคุมสวิตช์ IGBT Q_4, Q_6, Q_2 ตามลำดับ และสัญญาณ SVM PWM ที่ผ่านวงจร opto isolate ที่ป้องกันให้กับขาเกตของ IGBT แต่ละตัว พร้อมทั้งวัดสัญญาณ SVM PWM ที่ขา C เทียบ E ของ IGBT แต่ละตัว โดยแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงได้มาจากวงจรทวีแรงดัน 2 เท่า ทำให้วัดแรงดันที่ขา C เทียบ E ของ IGBT แต่ละตัวได้แรงดันสูงกว่าขนาดของแรงดันไฟสลับอินพุตเท่าตัว (ขนาดของแรงดันไฟสลับ $220V_{rms}$ และแรงดันไฟตรงหลังจากผ่านวงจรทวีแรงดันได้เป็นแรงดันไฟตรงขนาด $620V_{DC}$)

5.1.1.1 สัญญาณ PWM จาก FPGA หลังผ่านวงจรแปลงระดับแรงดัน

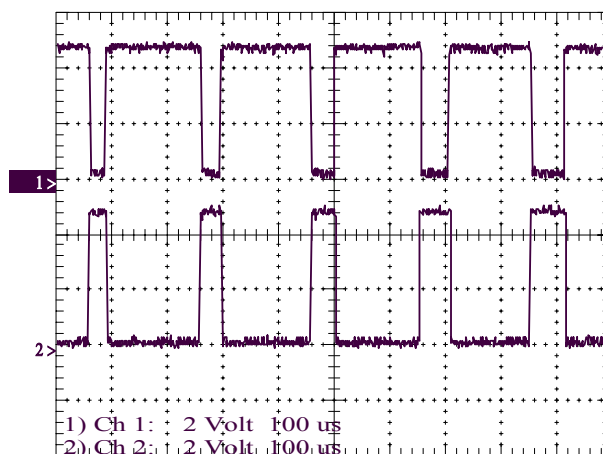
โดยสัญญาณที่วัดจากชุดแปลงระดับแรงดันจาก FPGA แรงดัน 3.3V โดยผ่าน IC CD4050B ทำการแปลงระดับแรงดันเอาต์พุตเป็น 5V โดยสัญญาณ SVM PWM (Active Low) มีเงื่อนไข ความถี่หลักมูล $50Hz$ ความถี่การสวิตช์ $5KHz$ และ Dead time $2.5\mu S$



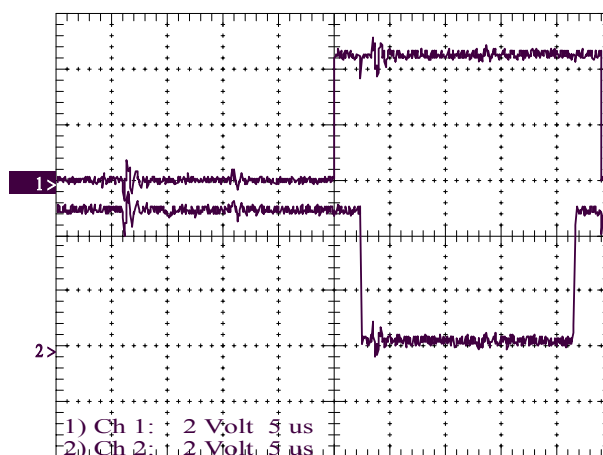
รูปที่ 5.2 วงจรแปลงระดับแรงดัน



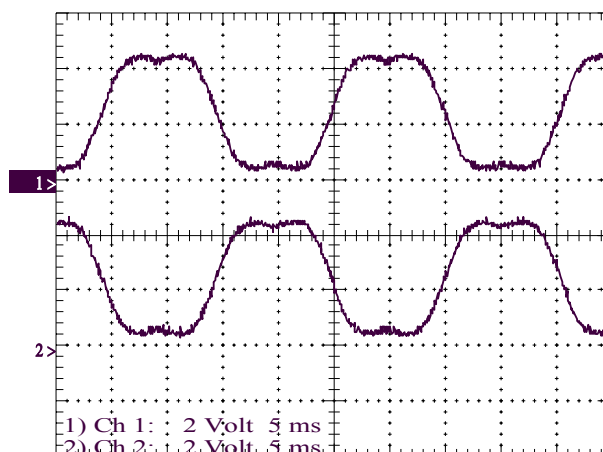
รูปที่ 5.3 รูปสัญญาณ PWM เอาท์พุทของ CD4050B ที่ V_a (CH1) และ $\overline{V_a}$ (CH2)



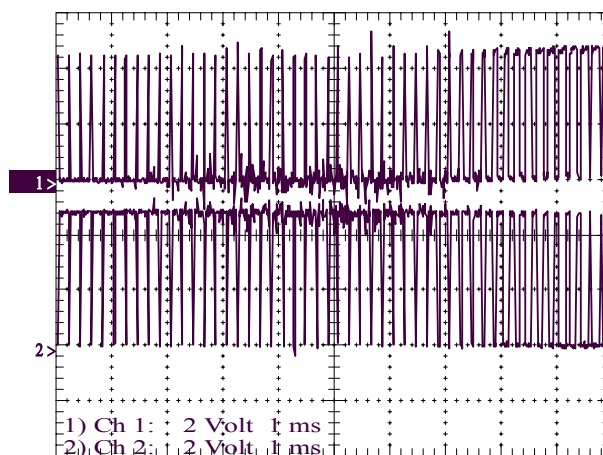
รูปที่ 5.4 รูปขยายสัญญาณ PWM ที่ เอาท์พุทของ CD4050B ที่ V_a (CH1) และ $\overline{V_a}$ (CH2) แสดงความถี่การสวิตช์ 5KHz



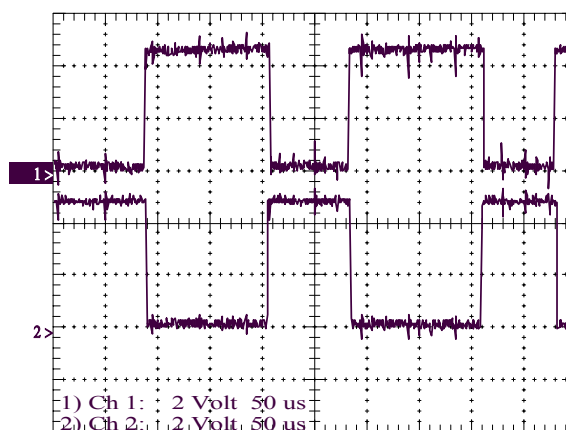
รูปที่ 5.5 รูปขยายสัญญาณ PWM ที่ เอาท์พุทของ CD4050B ที่ V_a (CH1) และ $\overline{V_a}$ (CH2) แสดง dead time $2.5\mu S$ active low



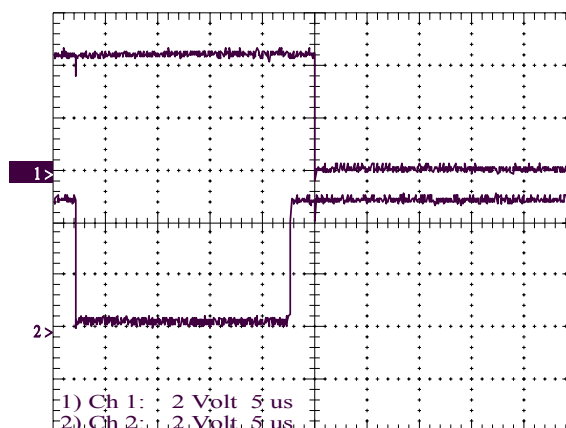
รูปที่ 5.6 รูปสัญญาณ PWM ที่เอาต์พุตของ CD4050B ที่ V_a (CH1) และ $\overline{V_a}$ (CH2) ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



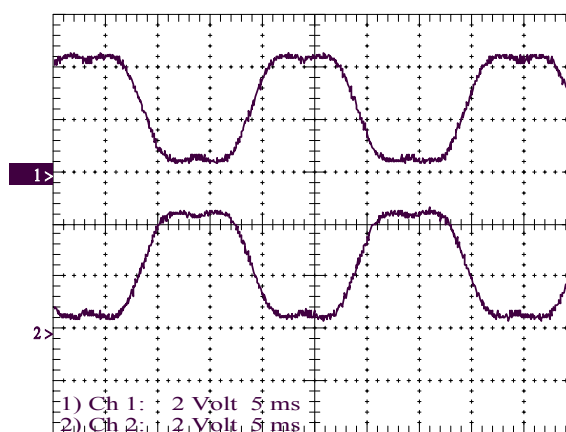
รูปที่ 5.7 รูปสัญญาณ PWM ที่เอาต์พุตของ CD4050B ที่ V_b (CH1) และ $\overline{V_b}$ (CH2)



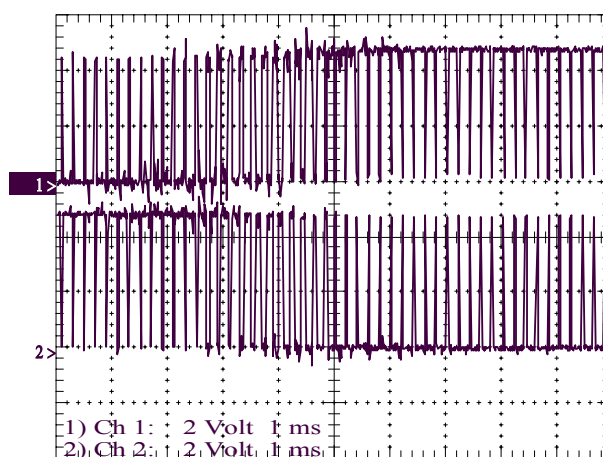
รูปที่ 5.8 รูปขยายสัญญาณ PWM ที่เอาต์พุตของ CD4050B ที่ V_b (CH1) และ $\overline{V_b}$ (CH2) แสดงความถี่การสวิตช์ 5KHz



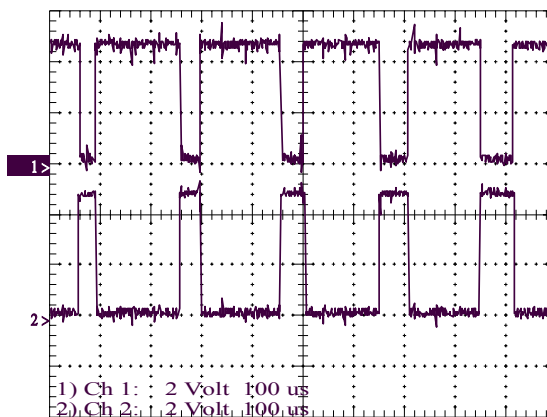
รูปที่ 5.9 รูปขยายสัญญาณ PWM ที่เอาต์พุตของ CD4050B ที่ V_b (CH1) และ $\overline{V_b}$ (CH2) แสดง dead time $2.5\mu S$ active low



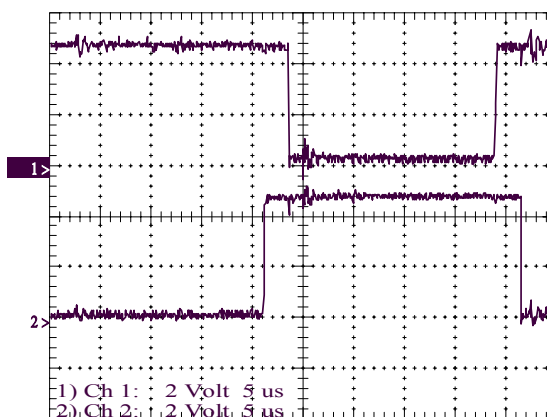
รูปที่ 5.10 รูปสัญญาณ PWM ที่เอาต์พุตของ CD4050B ที่ V_b (CH1) และ $\overline{V_b}$ (CH2) ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



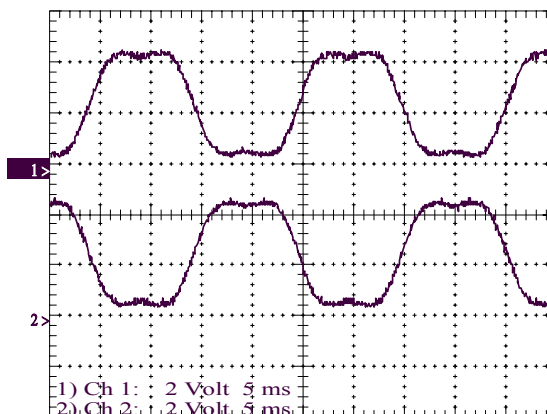
รูปที่ 5.11 รูปสัญญาณ PWM ที่เอาต์พุตของ CD4050B ที่ V_c (CH1) และ $\overline{V_c}$ (CH2)



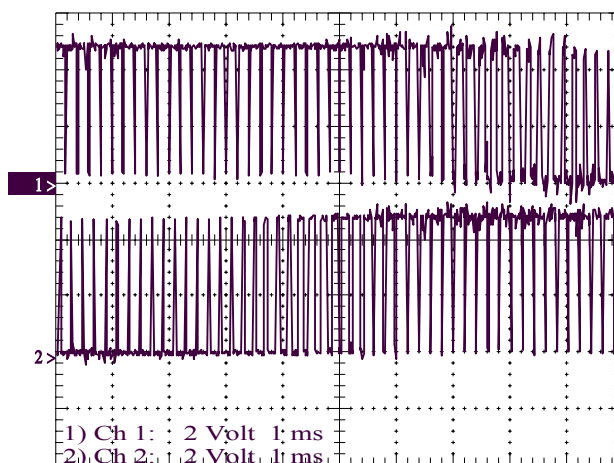
รูปที่ 5.12 รูปขยายสัญญาณ PWM ที่เอาต์พุตของ CD4050B ที่ V_c (CH1) และ $\overline{V_c}$ (CH2) แสดงความถี่การสวิตช์ 5KHz



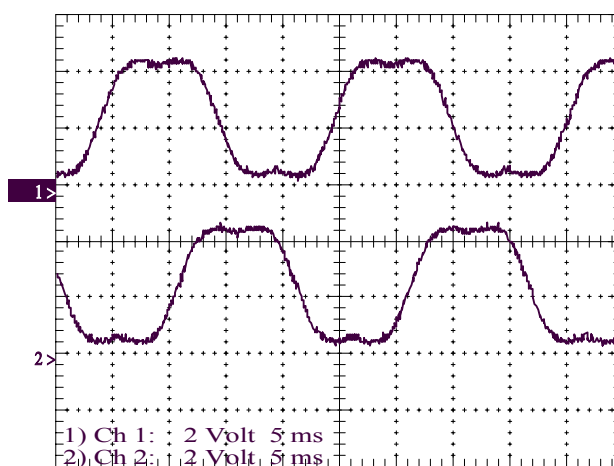
รูปที่ 5.13 รูปขยายสัญญาณ PWM ที่เอาต์พุตของ CD4050B ที่ V_c (CH1) และ $\overline{V_c}$ (CH2) แสดง dead time $2.5\mu S$ active low



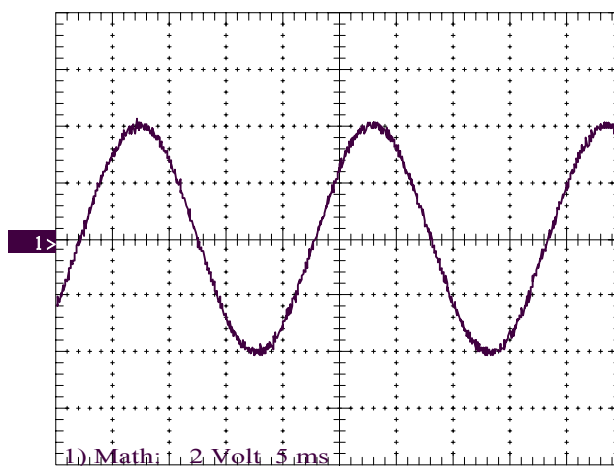
รูปที่ 5.14 รูปสัญญาณ PWM ที่เอาต์พุตของ CD4050B ที่ V_c (CH1) และ $\overline{V_c}$ (CH2) ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



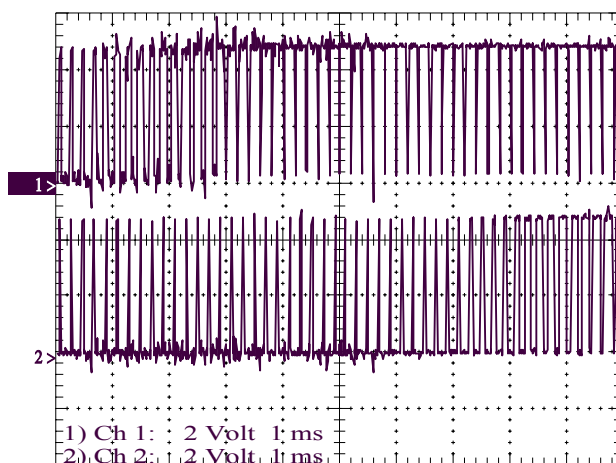
รูปที่ 5.15 รูปสัญญาณ PWM ที่เอาต์พุตของ CD4050B ที่ V_a (CH1) และ V_b (CH2) เทียบกัน



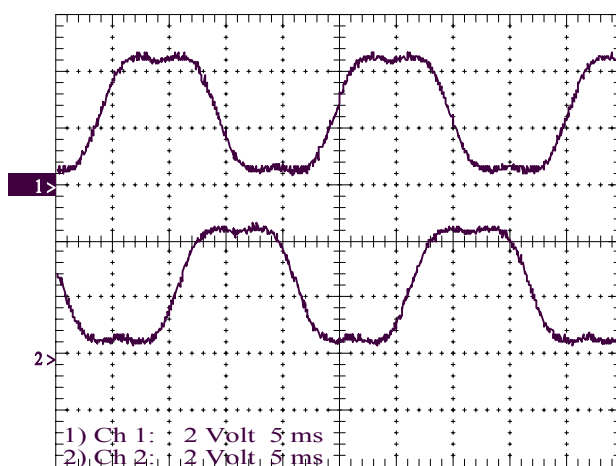
รูปที่ 5.16 รูปสัญญาณ PWM ที่เอาต์พุตของ CD4050B ที่ V_a (CH1) และ V_b (CH2) เทียบกันโดยผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



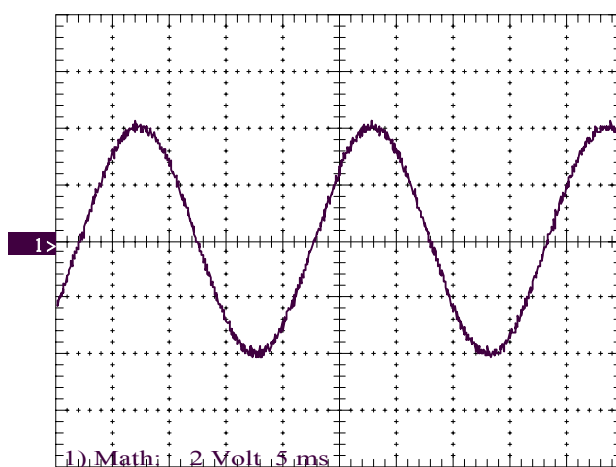
รูปที่ 5.17 รูปสัญญาณ ที่เอาต์พุตของ CD4050B ที่ V_a (CH1) ลบ V_b (CH2)



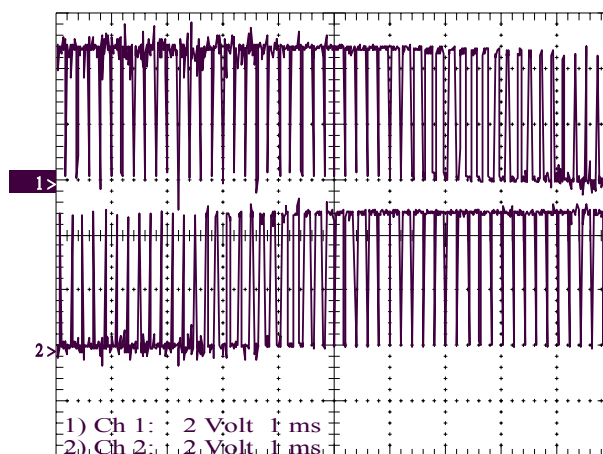
รูปที่ 5.18 รูปสัญญาณ PWM ที่เอาต์พุตของ CD4050B ที่ V_b (CH1) และ V_c (CH2) เทียบกัน



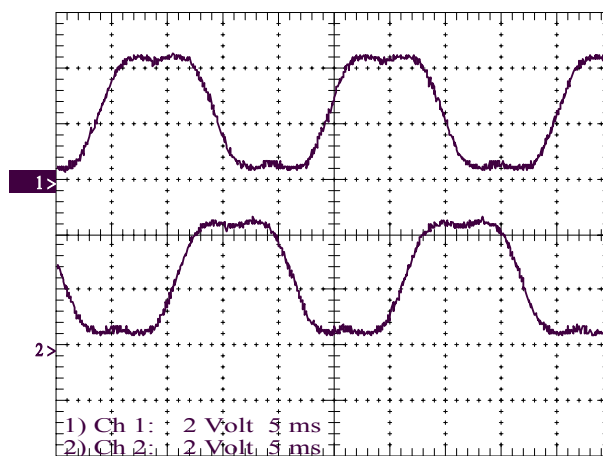
รูปที่ 5.19 รูปสัญญาณ PWM ที่เอาต์พุตของ CD4050B ที่ V_b (CH1) และ V_c (CH2) ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



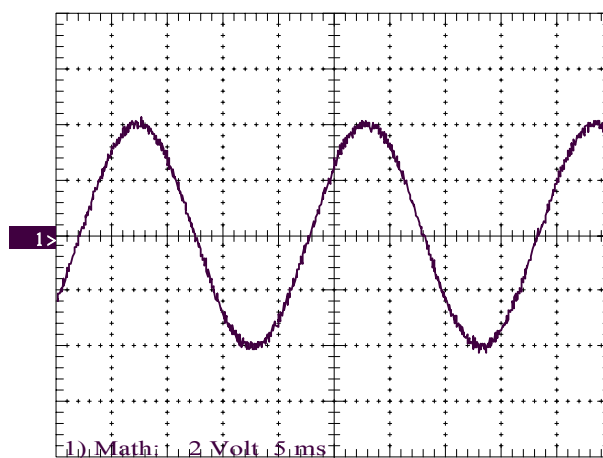
รูปที่ 5.20 รูปสัญญาณ PWM ที่เอาต์พุตของ CD4050B ที่ V_b (CH1) ลบ V_c (CH2)



รูปที่ 5.21 รูปสัญญาณ PWM ที่เอาต์พุตของ CD4050B ที่ V_c (CH1) และ V_a (CH2) เทียบกัน



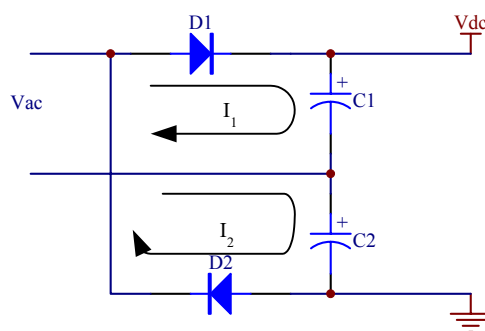
รูปที่ 5.22 รูปสัญญาณ PWM ที่เอาต์พุตของ CD4050B ที่ V_c (CH1) และ V_a (CH2) ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



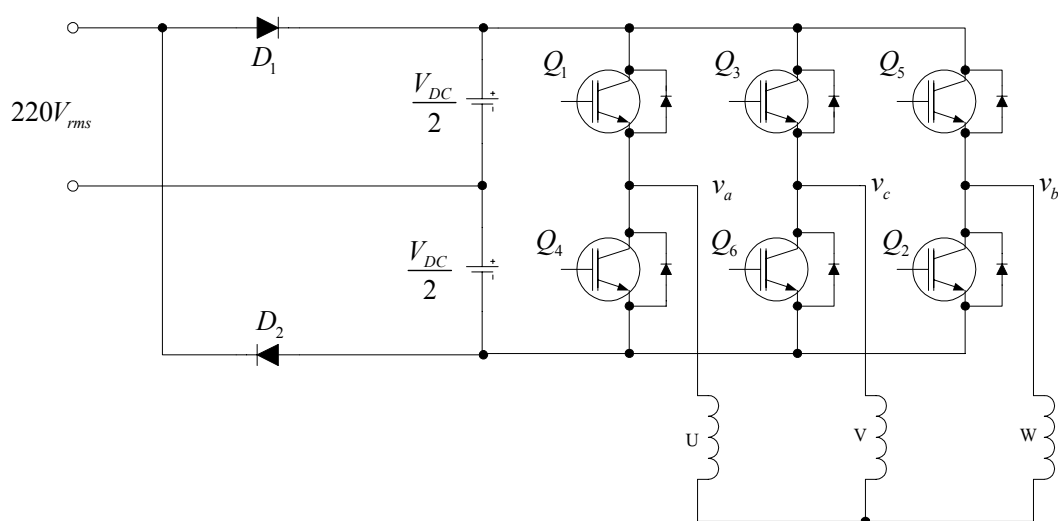
รูปที่ 5.23 รูปสัญญาณ PWM ที่เอาต์พุตของ CD4050B ที่ V_c (CH1) ลบ V_a (CH2)

5.1.1.2 สัญญาณ PWM วัดที่ขาเกตของ IGBT ที่จุดต่างๆ

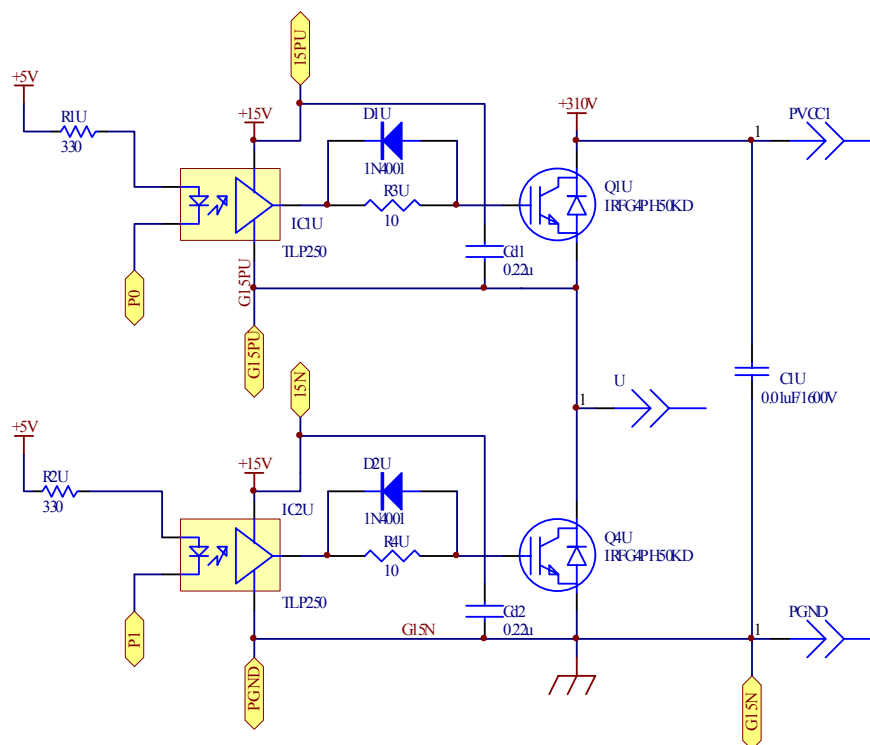
โดยในส่วนนี้จะเป็นการวัดสัญญาณ SVM PWM ที่ขาเกตของ IGBT ที่แสดงรูปวงจรจับสัญญาณดังรูปที่ 5.25 และ 5.26



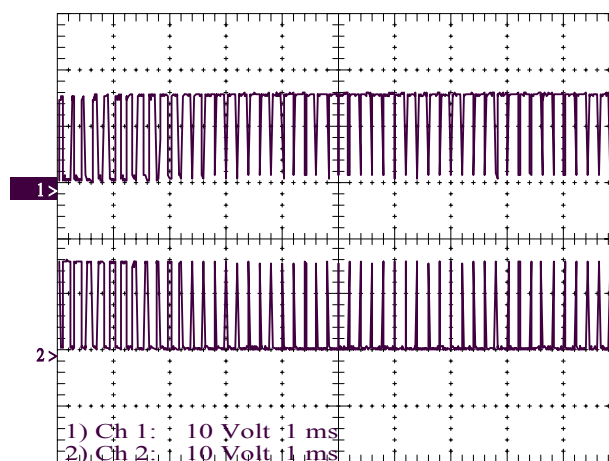
รูปที่ 5.24 วงจรเรกติไฟเออร์และทวิแรงดัน



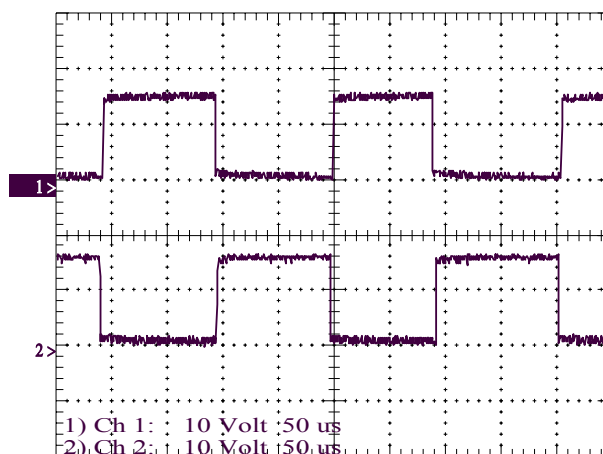
รูปที่ 5.25 วงจรทวิเรียงดันที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟตรงที่จ่ายให้กับชุดสวิตช์ IGBT



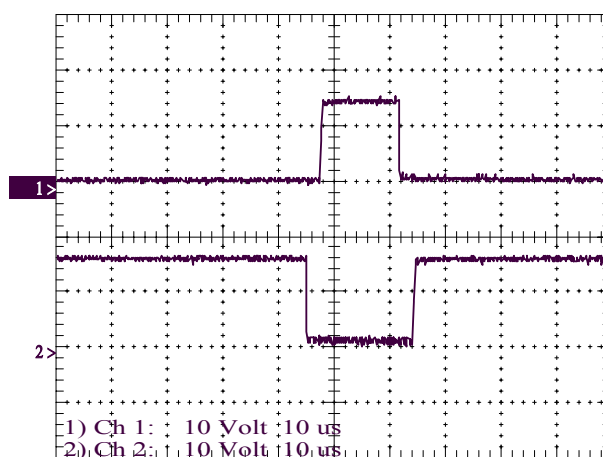
รูปที่ 5.26 วงจรภาคขับเคลื่อน IGBT ประกอบไปด้วยชุด opto isolate และชุดสวิตช์ IGBT



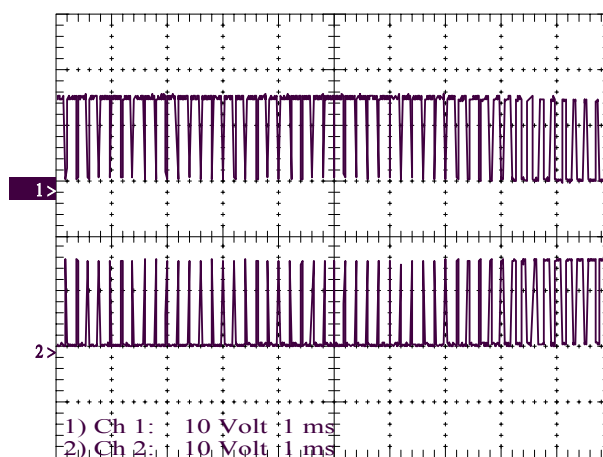
รูปที่ 5.27 รูปสัญญาณ PWM ที่ขาเกิดของสวิตช์ Q1U(CH1) และ Q4U(CH2)



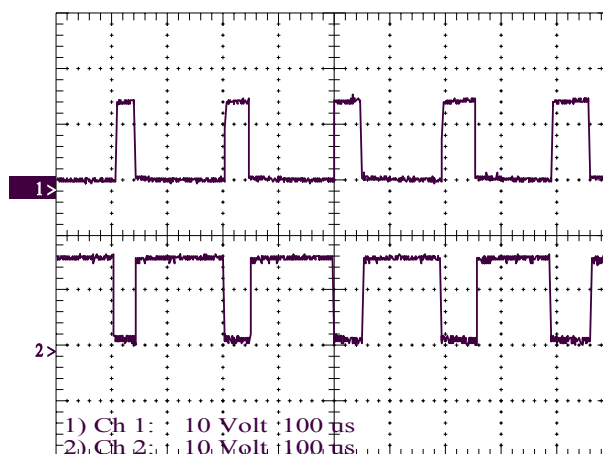
รูปที่ 5.28 รูปขยายสัญญาณ PWM ที่ขาเกิดของสวิตช์ Q1U(CH1) และ Q4U(CH2)



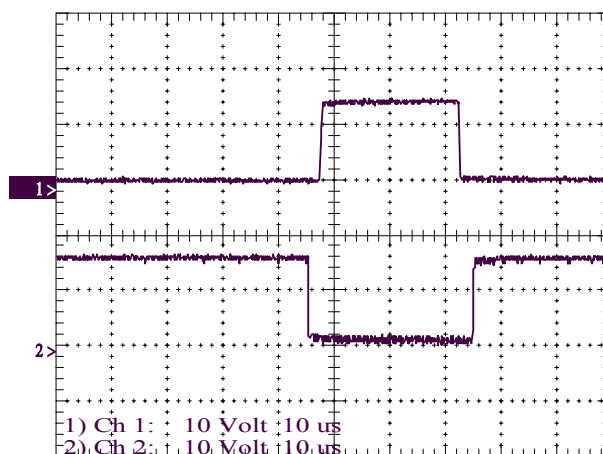
รูปที่ 5.29 รูปขยายสัญญาณ PWM ที่ขาเกิดของสวิตช์ Q1U(CH1) และ Q4U(CH2)
แสดง Dead time



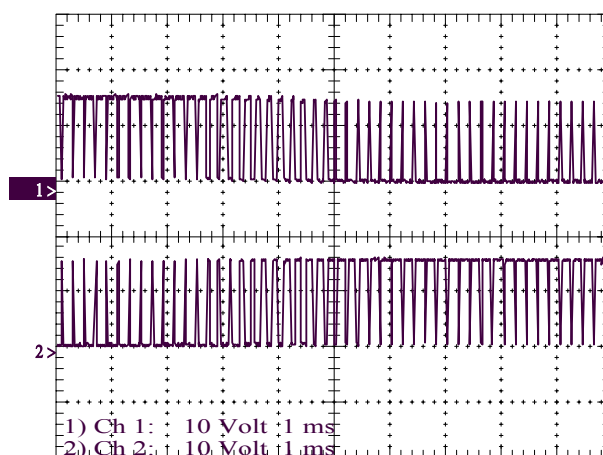
รูปที่ 5.30 รูปสัญญาณ PWM ที่ขาเกิดของสวิตช์ Q3V(CH1) และ Q6V(CH2)



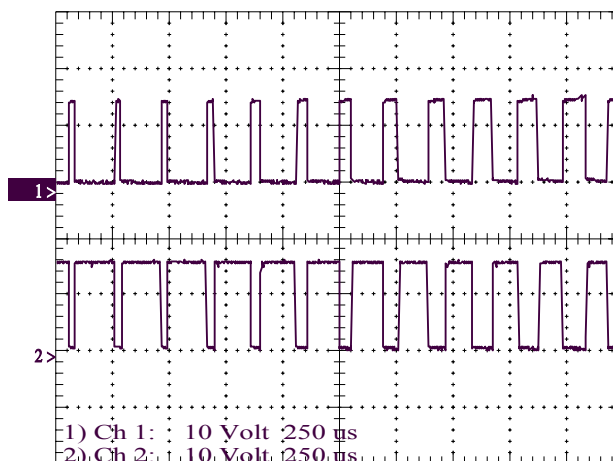
รูปที่ 5.31 รูปขยายสัญญาณ PWM ที่ขาเกิดของสวิตช์ Q3V(CH1) และ Q6V(CH2)



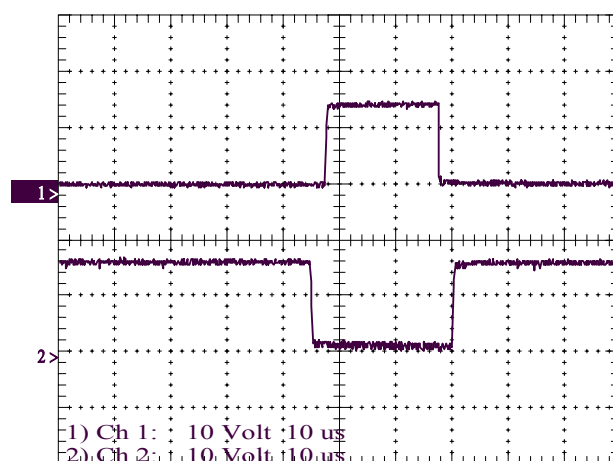
รูปที่ 5.32 รูปขยายสัญญาณ PWM ที่ขาเกิดของสวิตช์ Q3V(CH1) และ Q6V(CH2)
แสดง Deadtime



รูปที่ 5.33 รูปสัญญาณ PWM ที่ขาเกิดของสวิตช์ Q5W(CH1) และ Q2W(CH2)



รูปที่ 5.34 รูปขยายสัญญาณ PWM ที่ขาเกิดของสวิตช์ Q5W(CH1) และ Q2W(CH2)

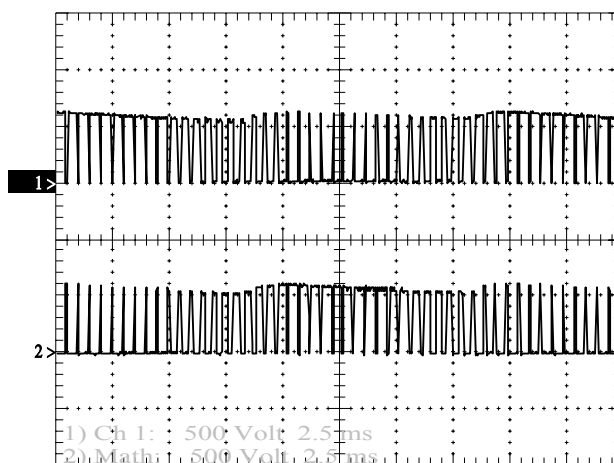


รูปที่ 5.35 รูปขยายสัญญาณ PWM ที่ขาเกิดของสวิตช์ Q5W(CH1) และ Q2W(CH2)

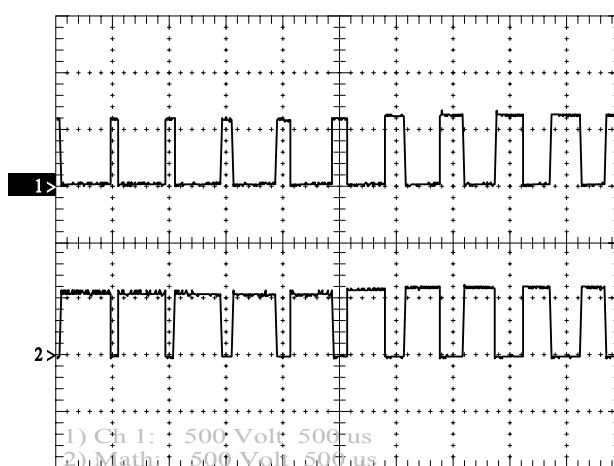
แสดง Deadtime

5.1.1.3 แสดงรูปสัญญาณที่ขา C, E ของสวิตช์

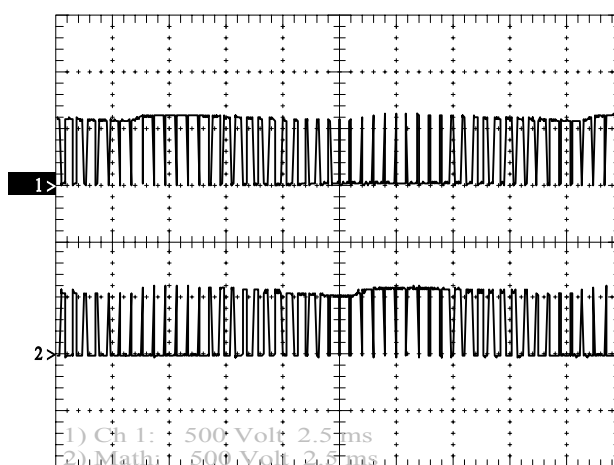
สัญญาณที่วัดเป็นสัญญาณ SVM PWM วัดที่ขา C และ E ของ IGBT ซึ่งเป็นสัญญาณ SVM PWM ที่ควบคุมการสวิตช์โดยขาเกิดของ IGBT โดยสัญญาณที่ได้จะใช้เป็นสัญญาณในการขับมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยขนาดแรงดันมีค่า 600 โวลต์



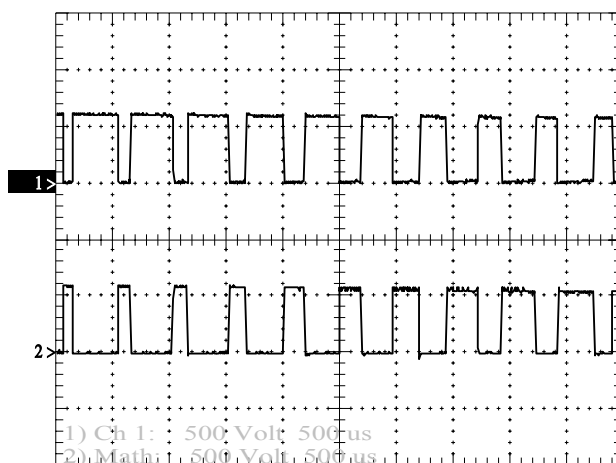
รูปที่ 5.36 รูปสัญญาณที่ขา C, E ของสวิตช์ Q1U(CH1) และ Q4U(CH2)



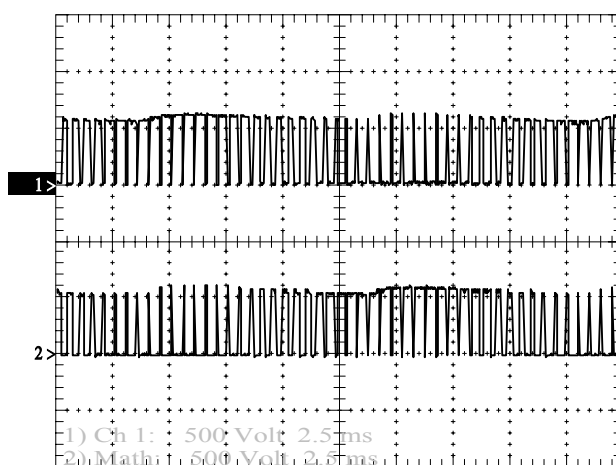
รูปที่ 5.37 รูปขยายสัญญาณที่ขา C, E ของสวิตช์ Q1U(CH1) และ Q4U(CH2)



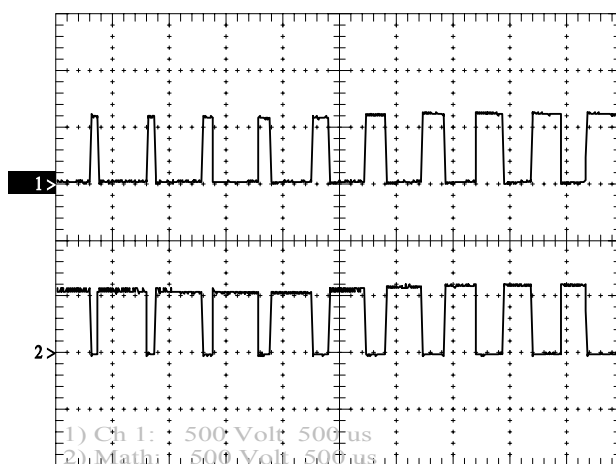
รูปที่ 5.38 รูปสัญญาณที่ขา C, E ของสวิตช์ Q3V(CH1) และ Q6V(CH2)



รูปที่ 5.39 รูปขยายสัญญาณที่ขา C, E ของสวิตช์ Q3V(CH1) และ Q6V(CH2)



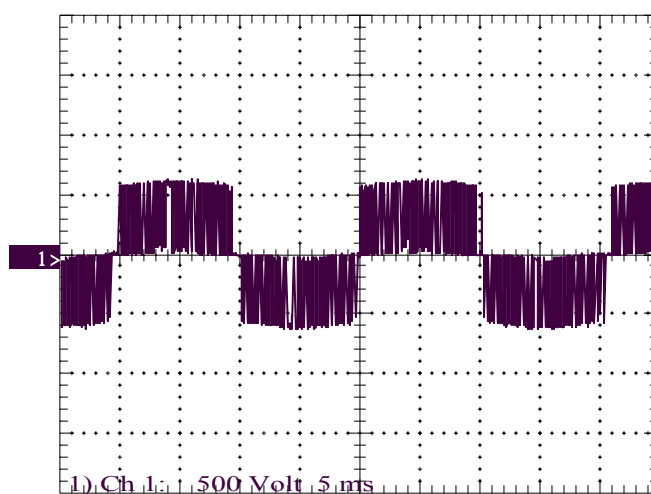
รูปที่ 5.40 รูปสัญญาณที่ขา C, E ของสวิตช์ Q5W(CH1) และ Q2W(CH2)



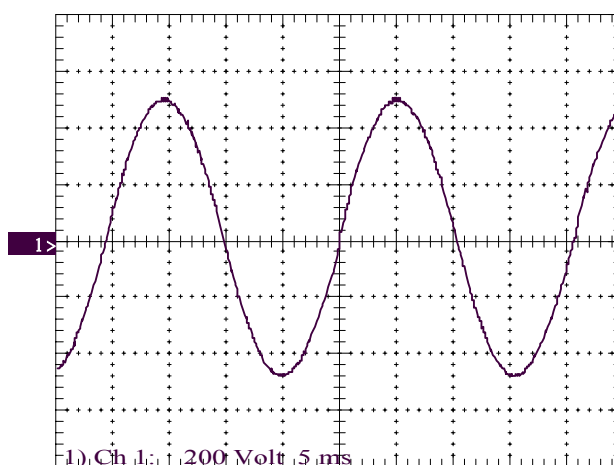
รูปที่ 5.41 รูปขยายสัญญาณที่ขา C, E ของสวิตช์ Q5W(CH1) และ Q2W(CH2)

5.1.1.4 สัญญาณ Out put PWM ที่จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3เฟส

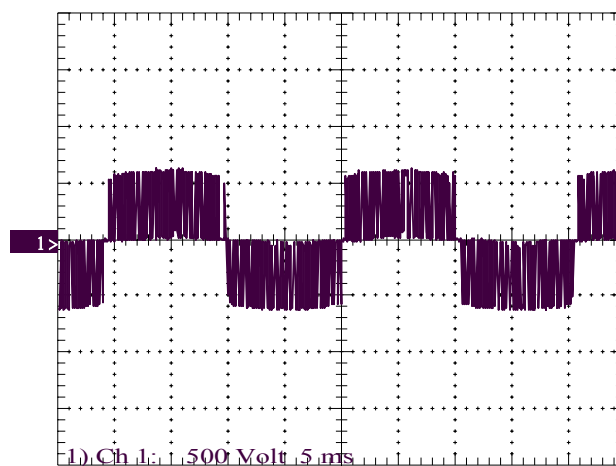
สัญญาณดังแสดงในรูปที่ 5.42 ถึงรูปที่ 5.47 เป็นสัญญาณแรงดันเข้าที่พุดที่จุด $v_a(U)$, $v_b(W)$, $v_c(V)$ ดังรูปที่ 5.25 โดยในรูปที่ 5.42 เป็นแรงดันที่วัดระหว่างสาย $v_a(U)$ และ $v_c(V)$ ในรูปที่ 5.43 เป็นสัญญาณของแรงดันในรูปที่ 5.42 หลังจากวัดผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยในรูปที่ 5.44 จนถึง 5.45 วัดแรงดันสาย $v_c(V)$ กับ $v_b(W)$ และรูปที่ 5.46 จนถึงรูปที่ 5.47 วัดแรงดันสาย $v_b(W)$ กับ $v_a(U)$



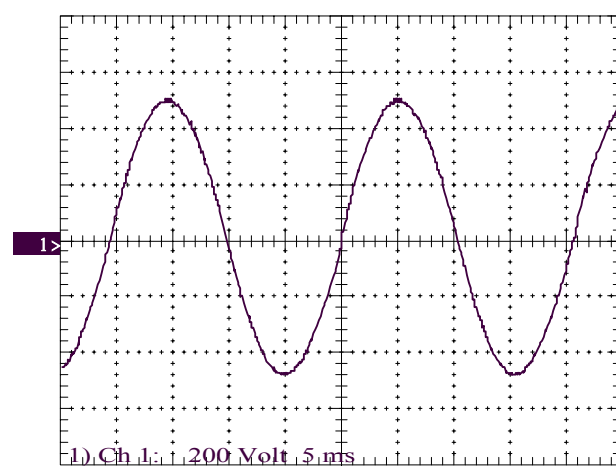
รูปที่ 5.42 สัญญาณ Out put PWM แรงดันสายที่ U และ V



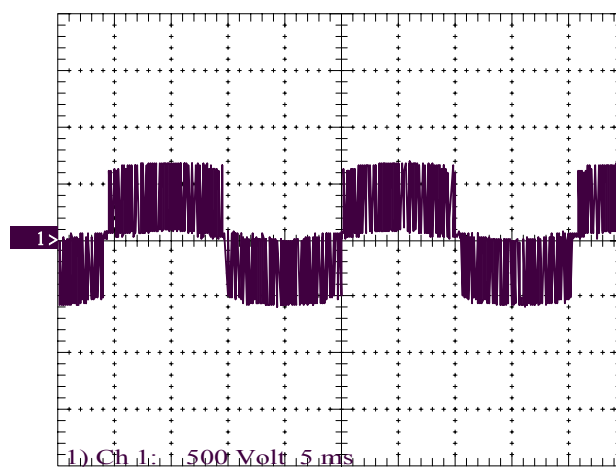
รูปที่ 5.43 สัญญาณ Out put PWM แรงดันสายที่ U และ V ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



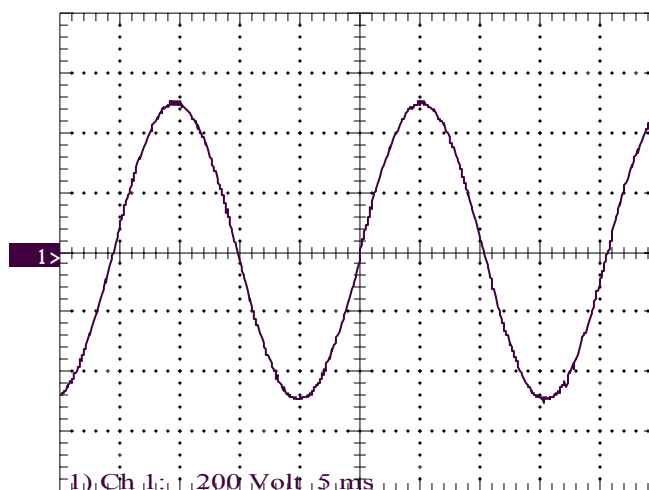
รูปที่ 5.44 สัญญาณ Out put PWM แรงดันสายที่ V และW



รูปที่ 5.45 สัญญาณ Out put PWM แรงดันสายที่ V และW ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



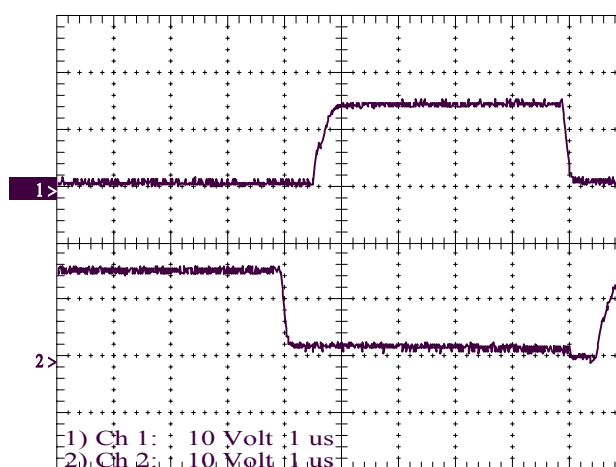
รูปที่ 5.46 สัญญาณ Out put PWM แรงดันสายที่ W และU



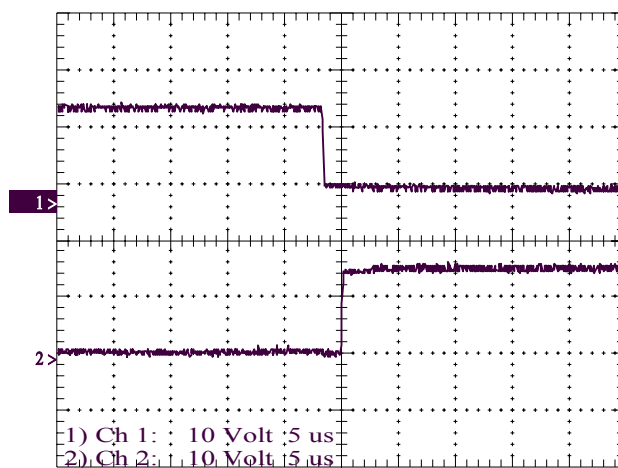
รูปที่ 5.47 สัญญาณ Out put PWM แรงดันสายที่ W และU ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

5.1.1.5 การปรับค่าเวลา dead time ค่าต่างๆ

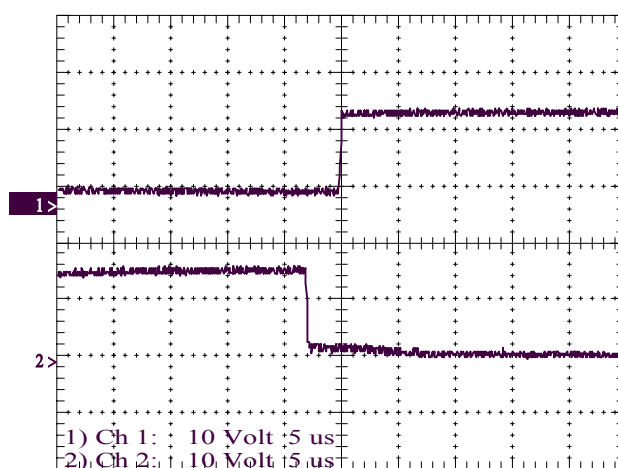
การกำหนดเวลา dead time เพื่อเป็นการหน่วงเวลาการสวิตช์เพื่อไม่ให้เกิดการสวิตช์พร้อมกันในแต่ละกิ่งคือ กิ่ง $v_a, \bar{v}_a$ กิ่ง $v_b, \bar{v}_b$ และ กิ่ง $v_c, \bar{v}_c$ ซึ่งหากสวิตช์พร้อมกันจะเป็นการลัดวงจรของแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรง 600 โวลต์ กับกราวด์ ซึ่งจะทำให้สวิตช์เสียหายได้ การกำหนดช่วงเวลา dead time จำเป็นต้องทราบว่าช่วงเวลา turn on และ turn off ของ IGBT เพื่อกำหนดช่วงเวลา dead time ในเหมาะสม แต่หากช่วงเวลา dead time กว้างมากเกินไปจะทำให้ค่าเฉลี่ยแรงดันลดลงด้วย



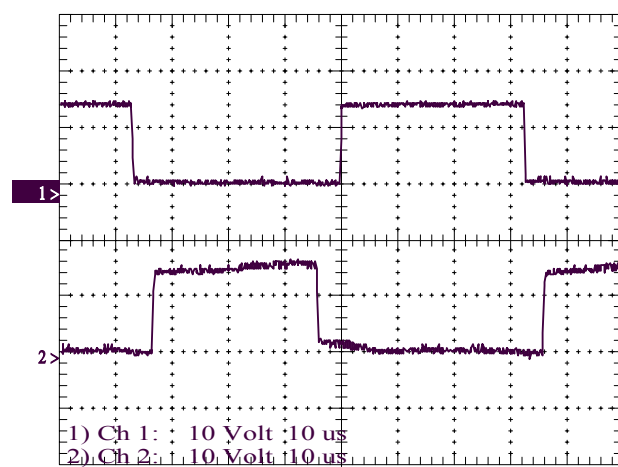
รูปที่ 5.48 รูปขยายสัญญาณแสดง Dead time $1\mu S$ ที่ขาเกิดของ Q1U(CH1) และ Q4U(CH2)



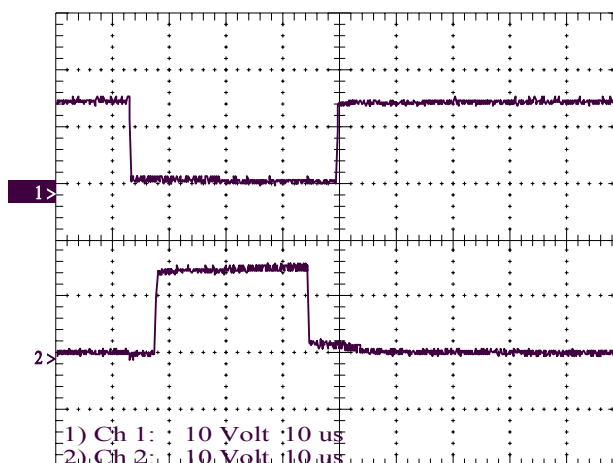
รูปที่ 5.49 รูปขยายสัญญาณแสดง Dead time $2\mu S$ ที่ขาเกิดของ Q1U(CH1) และ Q4U(CH2)



รูปที่ 5.50 รูปขยายสัญญาณแสดง Dead time $3\mu S$ ที่ขาเกิดของ Q1U(CH1) และ Q4U(CH2)



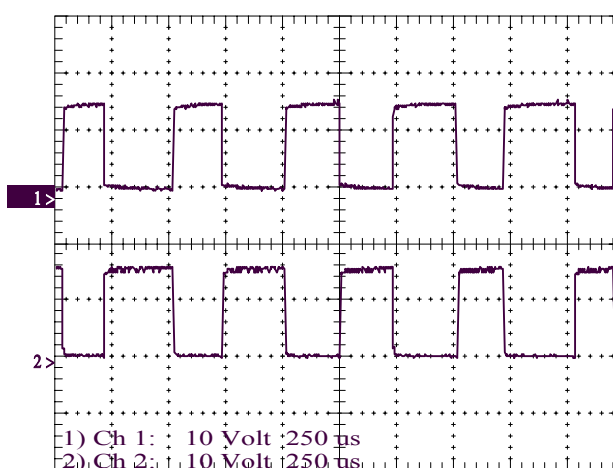
รูปที่ 5.51 รูปขยายสัญญาณแสดง Dead time $4\mu S$ ที่ขาเกิดของ Q1U(CH1) และ Q4U(CH2)



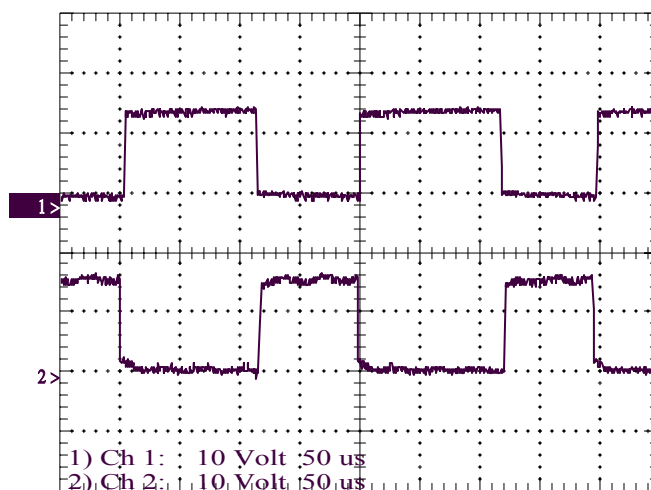
รูปที่ 5.52 รูปขยายสัญญาณแสดง Dead time $5\mu S$ ที่ขาเกิดของ Q1U(CH1) และ Q4U(CH2)

5.1.1.6 การปรับความถี่การสวิตช์ IGBT

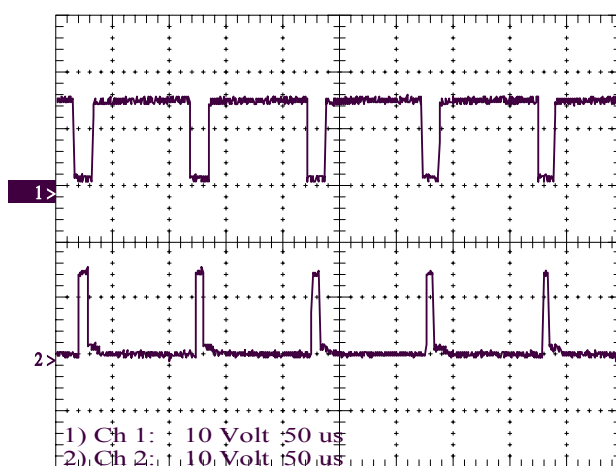
เป็นการปรับความถี่ของความเร็วการสวิตช์ของ IGBT ซึ่งไม่มีผลกับความถี่หลักมูลของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าสลับ โดยทั่วไปไม่มีผลอยู่หลายประการเช่น หากใช้ในวงจรแหล่งจ่ายแบบสวิตช์ซึ่งจะทำให้ขนาดของหม้อแปลงมีขนาดลดลง และออกแบบวงจรองได้ง่ายขึ้น ข้อเสียคือเกิดผลของการสูญเสียกำลังที่เกิดจากการสวิตช์ซึ่ง แต่ในการใช้ขั้วมอเตอร์เหนี่ยวนำ ผลของความถี่การสวิตช์จะลดผลของเสียงที่เกิดจากมอเตอร์ลงได้ ในการทดลองได้ทำการทดลองปรับความถี่สวิตช์หลายค่า



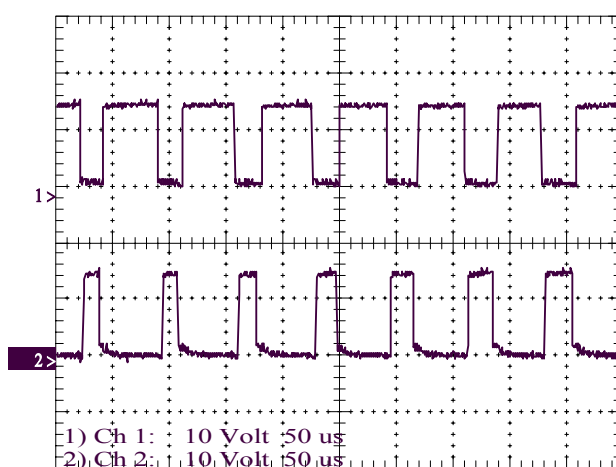
รูปที่ 5.53 รูปแสดงสัญญาณ ความถี่การสวิตช์ 2KHz ที่ขาเกิดของ Q1U(CH1) และ Q4U(CH2)



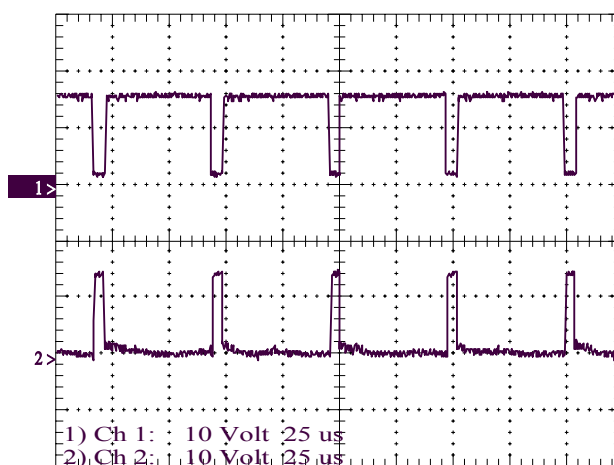
รูปที่ 5.54 รูปแสดงสัญญาณ ความถี่การสวิตช์ 5KHz ที่ขาเกิดของ Q1U(CH1) และ Q4U(CH2)



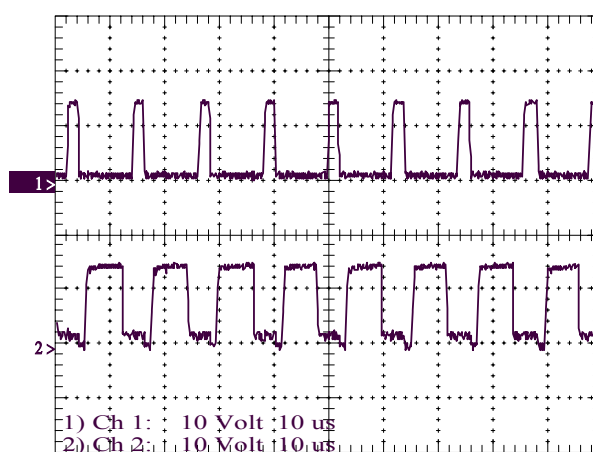
รูปที่ 5.55 รูปแสดงสัญญาณ ความถี่การสวิตช์ 10KHz ที่ขาเกิดของ Q1U(CH1) และ Q4U(CH2)



รูปที่ 5.56 รูปแสดงสัญญาณ ความถี่การสวิตช์ 15KHz ที่ขาเกิดของ Q1U(CH1) และ Q4U(CH2)



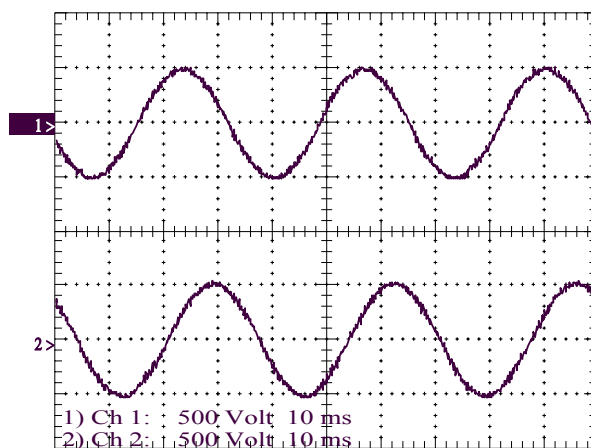
รูปที่ 5.57 รูปแสดงสัญญาณ ความถี่การสวิตช์ 20KHz ที่ขาเกิดของ Q1U(CH1) และ Q4U(CH2)



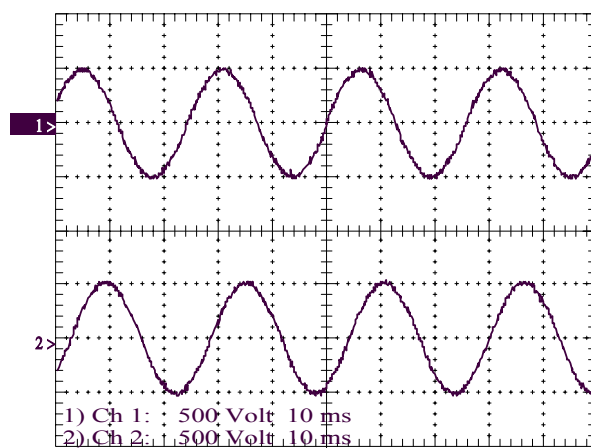
รูปที่ 5.58 รูปแสดงสัญญาณ ความถี่การสวิตช์ 80KHz ที่ขาเกิดของ Q1U(CH1) และ Q4U(CH2)

5.1.1.7 การปรับความถี่หลักมูลแรงดันไฟสลับที่จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

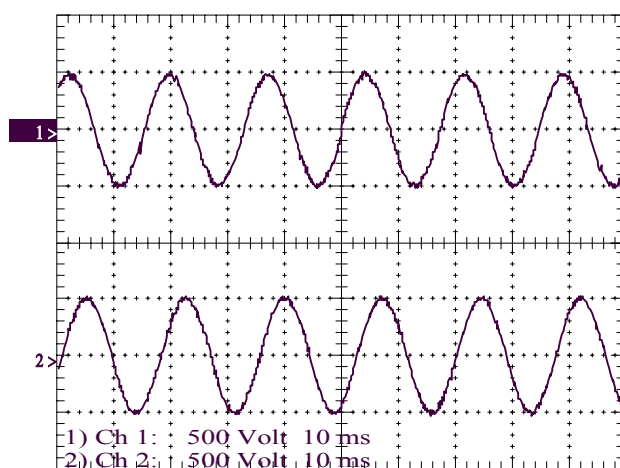
การปรับความถี่หลักมูลของไฟฟ้าสลับที่จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีผลโดยตรงกับความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับตามสมการที่ 2.1



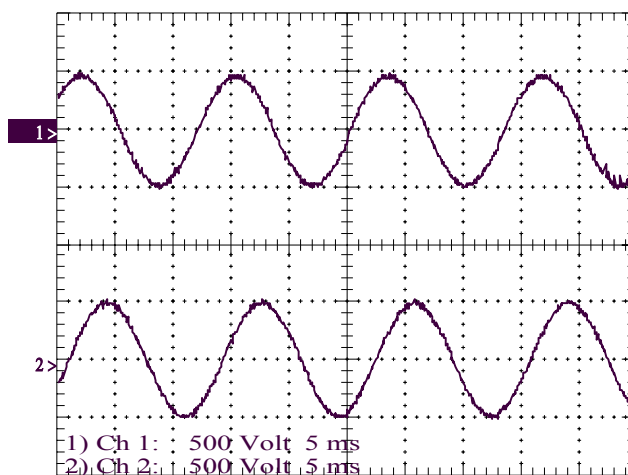
รูปที่ 5.59 รูปสัญญาณไฟสลับความถี่ 30Hz โดยวัดที่ v_{UV} (CH1) และ v_{WV} (CH2)



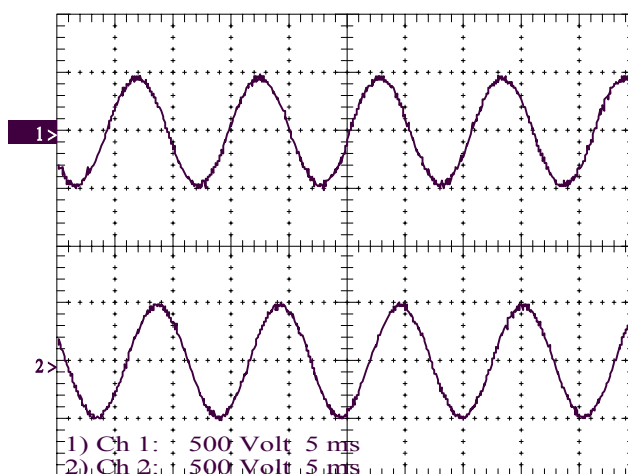
รูปที่ 5.60 รูปสัญญาณไฟสลับความถี่ 40Hz โดยวัดที่ v_{UV} (CH1) และ v_{WV} (CH2)



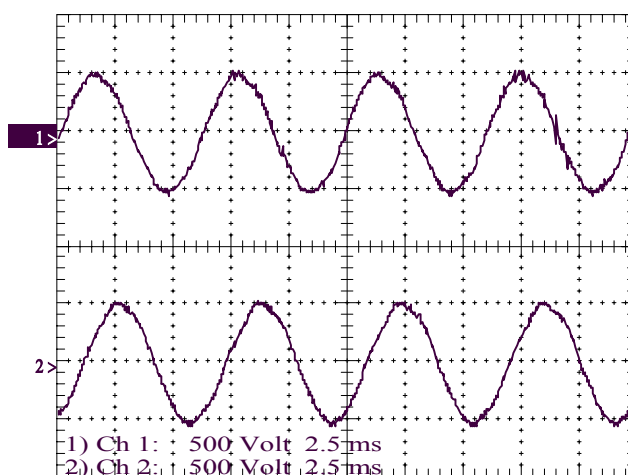
รูปที่ 5.61 รูปสัญญาณไฟสลับความถี่ 60Hz โดยวัดที่ v_{UV} (CH1) และ v_{WV} (CH2)



รูปที่ 5.62 รูปสัญญาณไฟสลับความถี่ 75Hz โดยวัดที่ v_{UV} (CH1) และ v_{WV} (CH2)



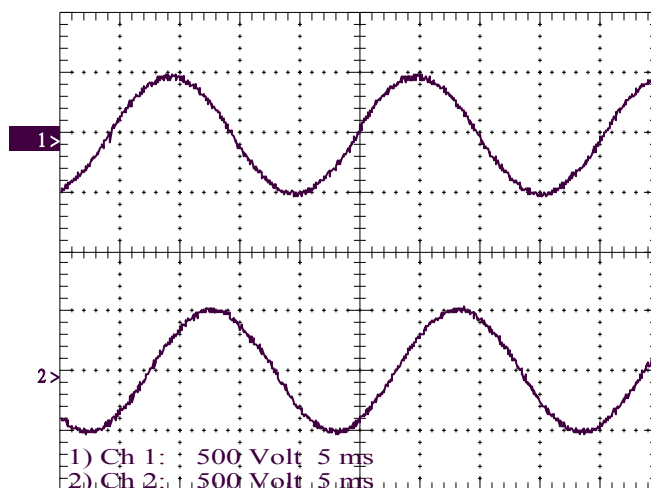
รูปที่ 5.63 รูปสัญญาณไฟสลับความถี่ 100Hz โดยวัดที่ v_{UV} (CH1) และ v_{WV} (CH2)



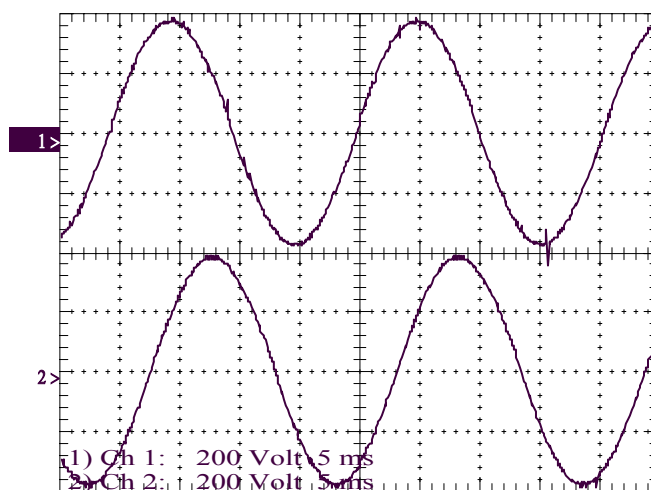
รูปที่ 5.64 รูปสัญญาณไฟสลับความถี่ 160Hz โดยวัดที่ v_{UV} (CH1) และ v_{WV} (CH2)

5.1.1.8 การปรับ Modulation Index

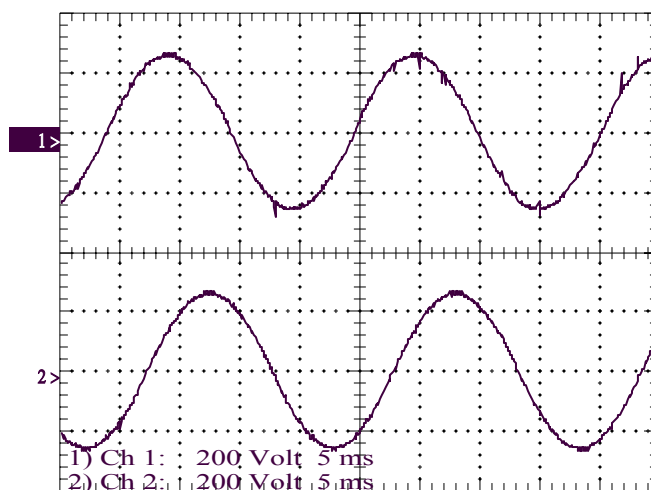
การปรับบรรรณิการมอดดูเลชั่นจะมีผลกับขนาดแรงดันของสัญญาณไฟฟ้าสลับที่ป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับ โดยวัดสัญญาณที่เงื่อนไข ความถี่แรงดันไฟสลับ 50Hz ความถี่การสวิตช์ 5KHz และ Dead time $3\mu\text{s}$



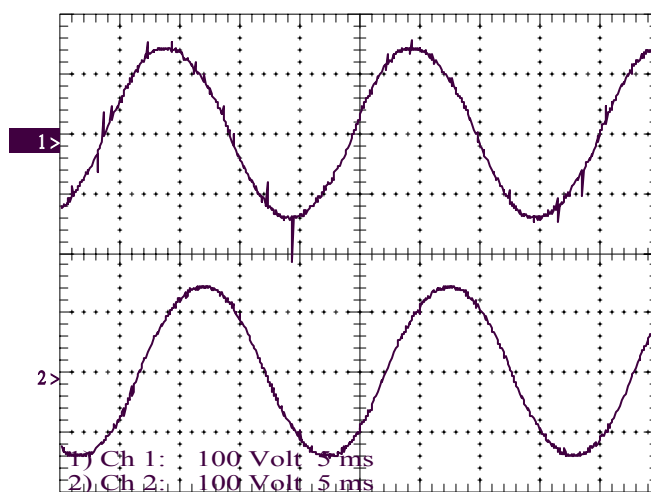
รูปที่ 5.65 รูปสัญญาณไฟสลับวัด ที่ v_{UV} (CH1) และ v_{WV} (CH2) , Modulation Index = 100%



รูปที่ 5.66 รูปสัญญาณไฟสลับวัด ที่ v_{UV} (CH1) และ v_{WV} (CH2) , Modulation Index = 75%



รูปที่ 5.67 รูปสัญญาณไฟสลั้วัด ที่ v_{UV} (CH1) และ v_{WV} (CH2) , Modulation Index = 50%



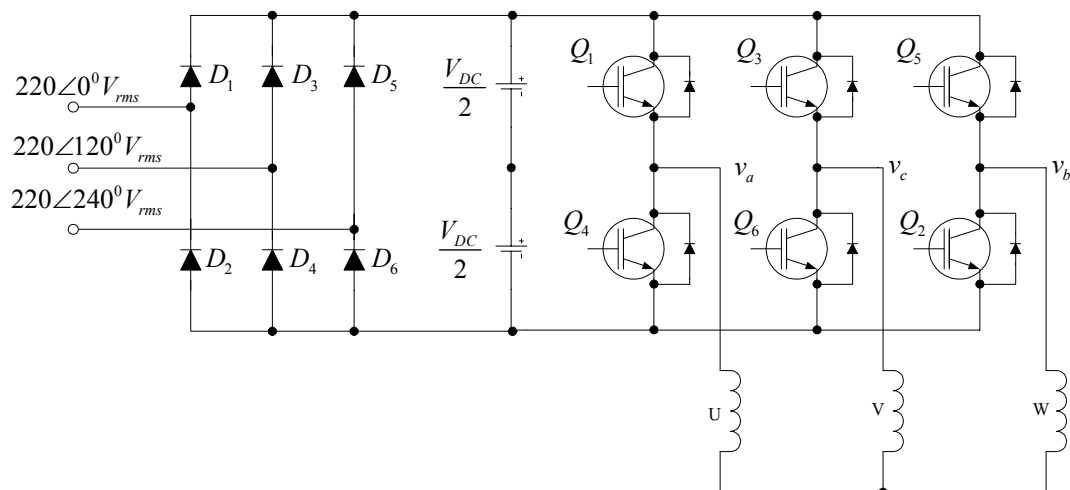
รูปที่ 5.68 รูปสัญญาณไฟสลั้วัด ที่ v_{UV} (CH1) และ v_{WV} (CH2) , Modulation Index = 25%

5.1.2 ผลทดสอบอินเวอร์เตอร์กับภาระโหลดที่เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 1 แรงม้า ที่มีการจ่ายภาระทางกล ด้วยชุดทดสอบยี่ห้อ SIEMENS

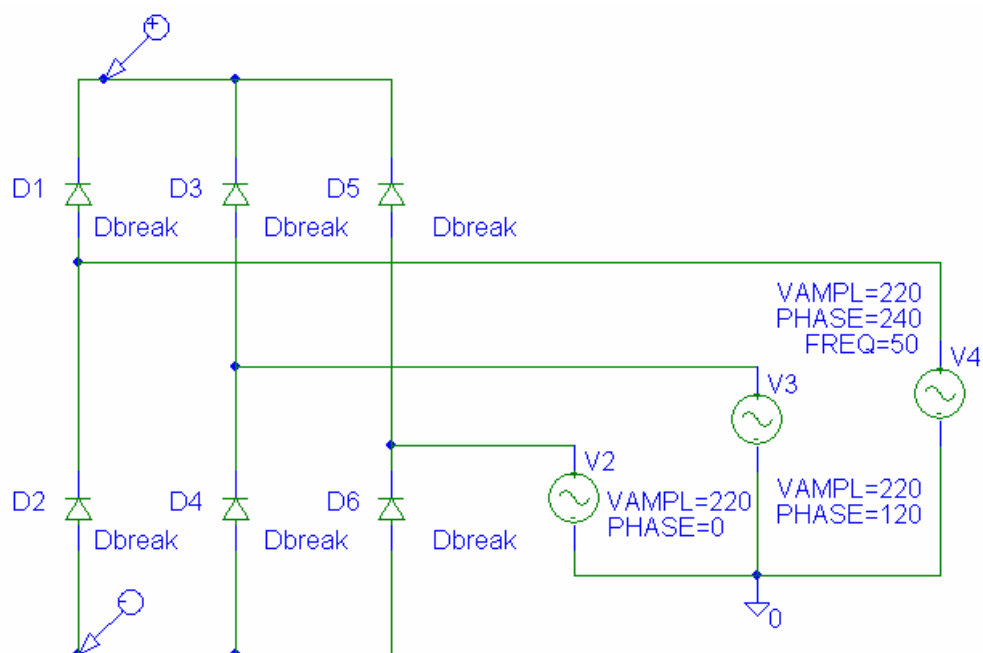
5.1.2.1 วงจรชุดขับสวิตช์ และวงจรเรียงกระแสแบบ 3 เฟสที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟตรง

จากรูปที่ 5.69 แสดงวงจรชุดสวิตช์ IGBT โดย Q_1 Q_4 ใช้ขับขดลวด U ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส และ Q_3 Q_6 ใช้ขับขดลวด V ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส และ Q_5 Q_2 ใช้ขับขดลวด W ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงที่จ่ายให้กับชุดสวิตช์ IGBT ใช้วงจร

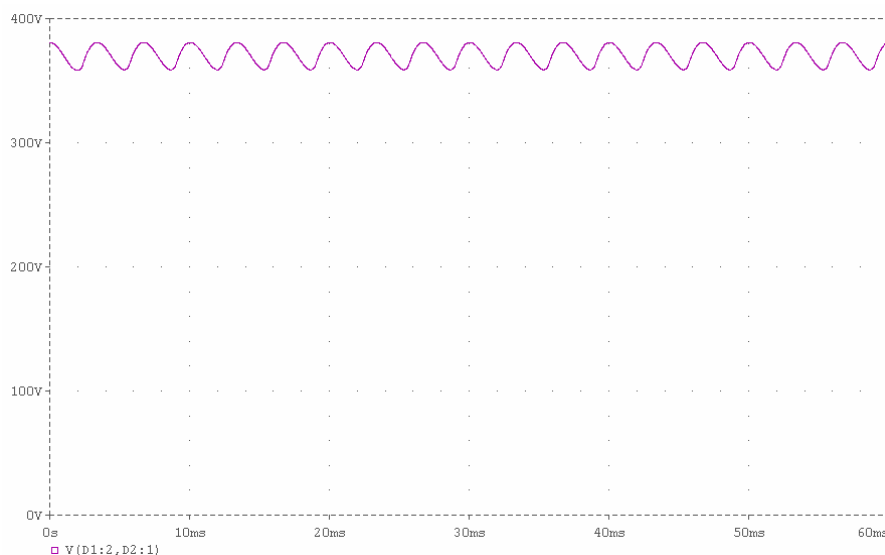
เรียงกระแสแบบ 3 เฟส 6 ลูกคลื่นเพื่อให้ได้แรงดันกระเพื่อม (ripple voltage) ที่ต่ำเมื่อมอเตอร์ดึงกระแสสูง และลดผลของความถี่แรงดันกระเพื่อม (ripple frequency)



รูปที่ 5.69 วงจรชุดสวิตช์ และวงจรเรียงกระแส 3 เฟส



รูปที่ 5.70 วงจรเรียงกระแส 3 เฟสที่ใช้ในการจำลองการทำงานโดย Pspice



รูปที่ 5.71 ผลการจำลองการทำงานวงจรเรียงกระแส 3 เฟส

รูปไดอะแกรมการต่อการทดสอบอินเวอร์เตอร์ทำการทดสอบด้วยชุดทดสอบมอเตอร์ยี่ห้อ SIEMENS โดยบล็อกไดอะแกรมของระบบที่ใช้ในการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.81

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- อินเวอร์เตอร์ 3 เฟสที่นำเสนอ	1 ชุด
- Induction Motor 3 Phase 1 HP 4 Pole 380 V	1 ตัว
- SIEMENS DC Generator	1 ตัว
- SIEMENS Measurement and Analyzing Unit	1 ตัว
- Linear Load 1000W	1 ชุด
- 3 Phase Digital Power Meter	2 ตัว
- Variac 1 Phase 15 A	4 ตัว
- Bridge Rectifier	1 ชุด
- Fuse 10 A	1 ชุด

ผลการทดสอบประกอบด้วย

ตารางที่ 5.1 ตารางบันทึกผลการทดสอบแรงบิดขณะเปลี่ยน Load

ตารางที่ 5.2 ตารางบันทึกผลการทดสอบการเปลี่ยนความถี่การสวิตช์

ตารางที่ 5.3 ผลทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะต่อตรงกับแหล่งจ่ายไฟสลับ 3 เฟส ไม่ผ่าน

Inverter

การทดลองในตารางที่ 5.1 ตารางบันทึกผลการทดสอบแรงบิดขณะเปลี่ยน Load เป็นการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยทำการทดสอบแบ่งเป็น 3 ช่วงคือ ขณะไม่ต่อ Load และต่อ Load 50% และ 100% ตามลำดับ โดยการต่อ Load แต่ละครั้งจะมีการปรับความถี่ไฟฟ้าสลับเป็นค่า 50Hz 40Hz 30Hz และ 20Hz โดยในส่วนของ 20Hz จะทำการปรับครีนิมอดดูเลชั่นเพิ่มขึ้นเพื่อเพิ่มแรงดัน โดยที่ในความถี่ 50Hz 40Hz 30Hz และ 20Hz จะปรับค่ามอดดูเลชั่น 100% 80% 60% และ 40% ตามลำดับเพื่อให้อัตราส่วนระหว่าง แรงดันต่อความถี่คงที่ โดยจะเห็นได้ว่า ความถี่สูงขึ้นมีผล กับ กำลังงาน และความเร็วรอบของมอเตอร์เพิ่มขึ้นตามความถี่ และการปรับครีนิมอดดูเลชั่นเป็นการเพิ่มขนาดแรงดันที่มอเตอร์มีผลให้ความเร็วรอบ และกำลังงานที่มอเตอร์เพิ่มขึ้นได้เช่นกัน

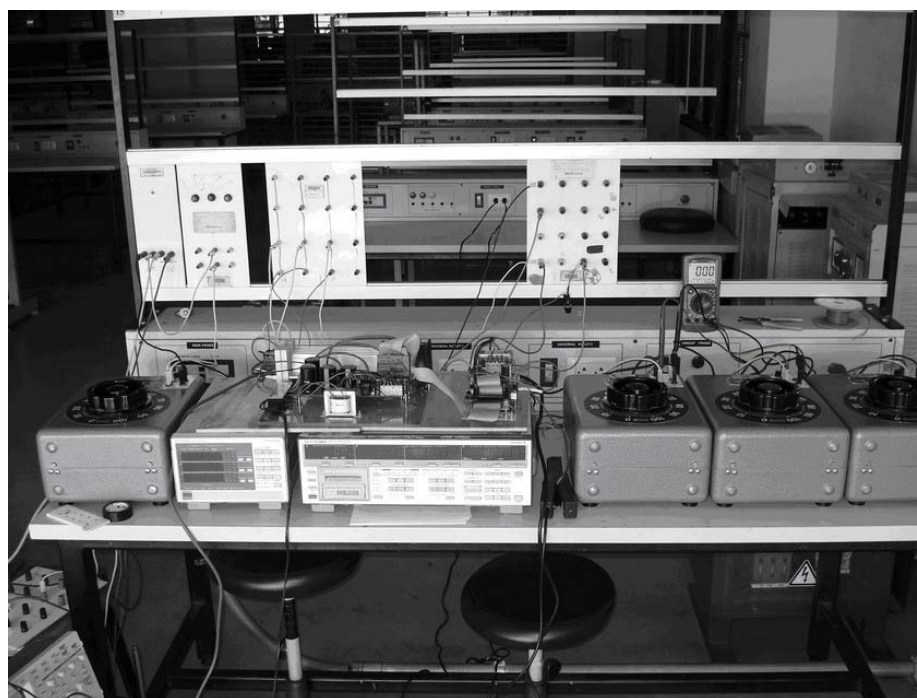
การทดลองในตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบการเปลี่ยนความถี่การสวิตช์ มีผลให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ลดลงเนื่องจากค่าเฉลี่ยแรงดันที่มอเตอร์จะลดลงด้วย และยังมีการสวิตช์ความถี่สูงขึ้นจะทำให้เกิดการสูญเสียกำลังงานที่สวิตช์มากขึ้น

การทดลองในตารางที่ 5.3 เป็นการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ ขณะที่ไม่ได้ขับมอเตอร์ผ่าน ชูคอินเวอร์เตอร์ นั่นคือการขับโดยตรง เพื่อหาคุณสมบัติของมอเตอร์ที่ใช้ทดลอง โดยจะเห็นว่าขณะที่ต่อ Load ให้กับมอเตอร์ 100% ความเร็วรอบจะลดลงจากกรณีที่ Load มีค่าต่ำ

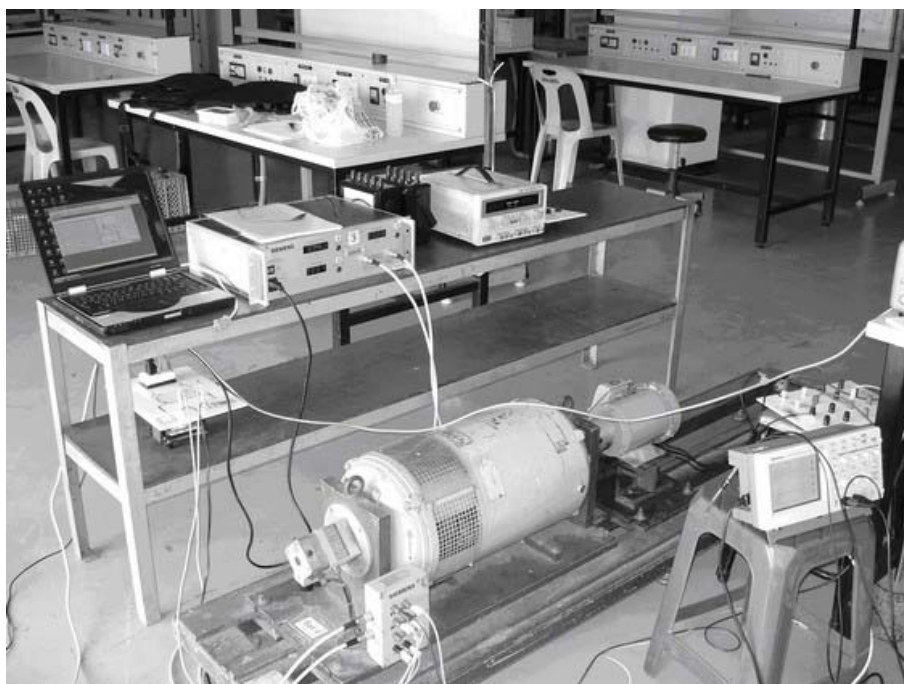
ความหมายของตัวแปรในตารางการทดสอบมอเตอร์

f_{MOTOR} (Motor frequency)	หมายถึง ความถี่หลักมูลของไฟฟ้าสลับที่ป้อนให้กับมอเตอร์ หน่วยคือ Hz(Hertz)
f_s (Switching frequency)	หมายถึง ความถี่การสวิตช์ของ IGBT หน่วยคือ Hz(Hertz)
Deadtime	หมายถึง ช่วงเวลาการหน่วงสัญญาณของสวิตช์ขับในกึ่งเดียวกันเพื่อป้องกันการลัดวงจร หน่วยคือ S(second)
Step	หมายถึง ตัวแปรใน FPGA ที่ใช้ในการปรับค่าความถี่หลักมูลของแรงดันไฟสลับที่ให้กับมอเตอร์
Command	หมายถึง เงื่อนไขการทำงานของอินเวอร์เตอร์โดยเป็นการกำหนดความถี่มอเตอร์ และครีนิมอดดูเลชั่น
Freq (Frequency)	หมายถึง ความถี่สัญญาณไฟฟ้าสลับที่ป้อนให้กับมอเตอร์ หน่วยคือ Hz(Hertz)
Mod(Modulation index)	หมายถึง ครีนิมอดดูเลชั่น หน่วยคือ %
Vin(Input voltage)	หมายถึง แรงดันที่ป้อนเข้าชูคอินเวอร์เตอร์ หน่วยคือ Vrms
Iin(Input current)	หมายถึง กระแสที่ป้อนเข้าชูคอินเวอร์เตอร์ หน่วยคือ Arms

Pin(Power input)	หมายถึง กำลังงานที่ป้อนเข้าชุดอินเวอร์เตอร์ หน่วยคือ KW (Kilo Watts)
V(Output voltage)	หมายถึง แรงดันที่ออกจากชุดอินเวอร์เตอร์ หน่วยคือ Vrms
I(Output current)	หมายถึง กระแสที่ออกจากชุดอินเวอร์เตอร์ หน่วยคือ Arms
Po(Power output)	หมายถึง กำลังงานที่ออกจากชุดอินเวอร์เตอร์ หน่วยคือ KW (Kilo Watts)
Eff(Efficiency)	หมายถึง ค่าประสิทธิภาพของปริมาณกำลังงานขาออกเทียบกับขาเข้า
Tq(Torque)	หมายถึง แรงบิด หน่วยคือ nM(newton Metre)
Speed	หมายถึง ความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์เป็นจำนวนรอบต่อ นาที หน่วยคือ r.p.m.(revolution per minute)
Pload(load power)	หมายถึง กำลังงานที่วัดที่ Load(Motor) หน่วยคือ W (watt)



รูปที่ 5.72 ชุดขับอินเวอร์เตอร์ 3เฟสจะต่ออยู่กับ Variac 1เฟส 3ตัว ที่ทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายแรงดัน 3เฟสให้กับชุดไดโอดเรียงกระแส 3เฟส แบบ6คลื่น



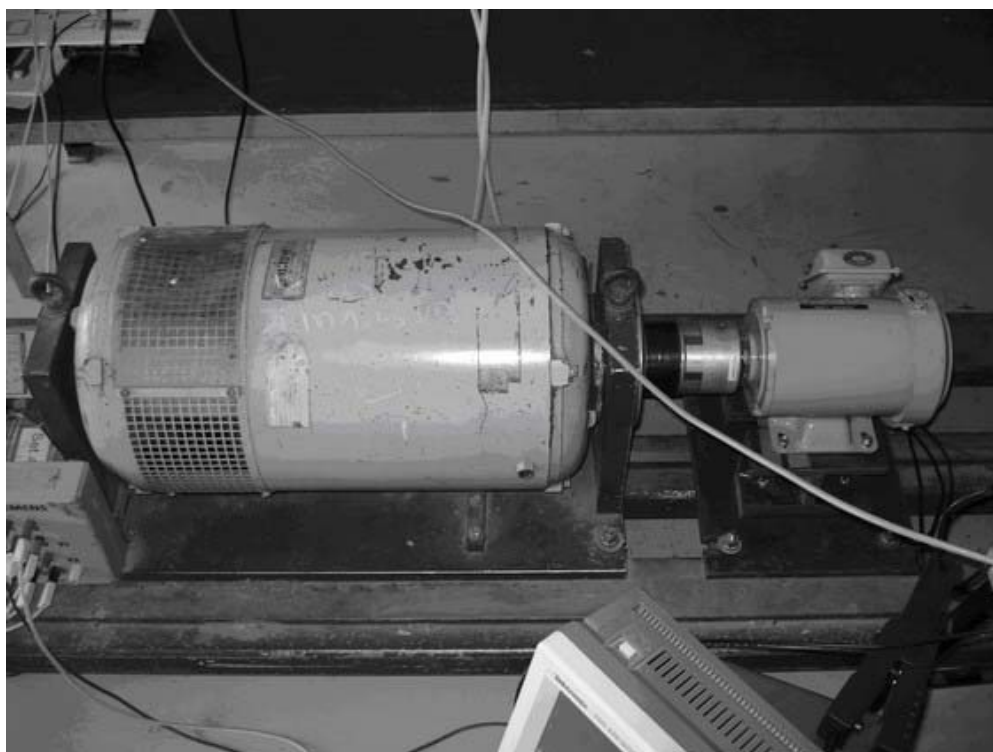
รูปที่ 5.73 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบอินเวอร์เตอร์กับการจ่ายโหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่มีภาระทางกล



รูปที่ 5.74 Digital Power Meter 3 Phase ยี่ห้อ YOKOKAWA รุ่น WT1030 ที่ใช้บันทึกผล



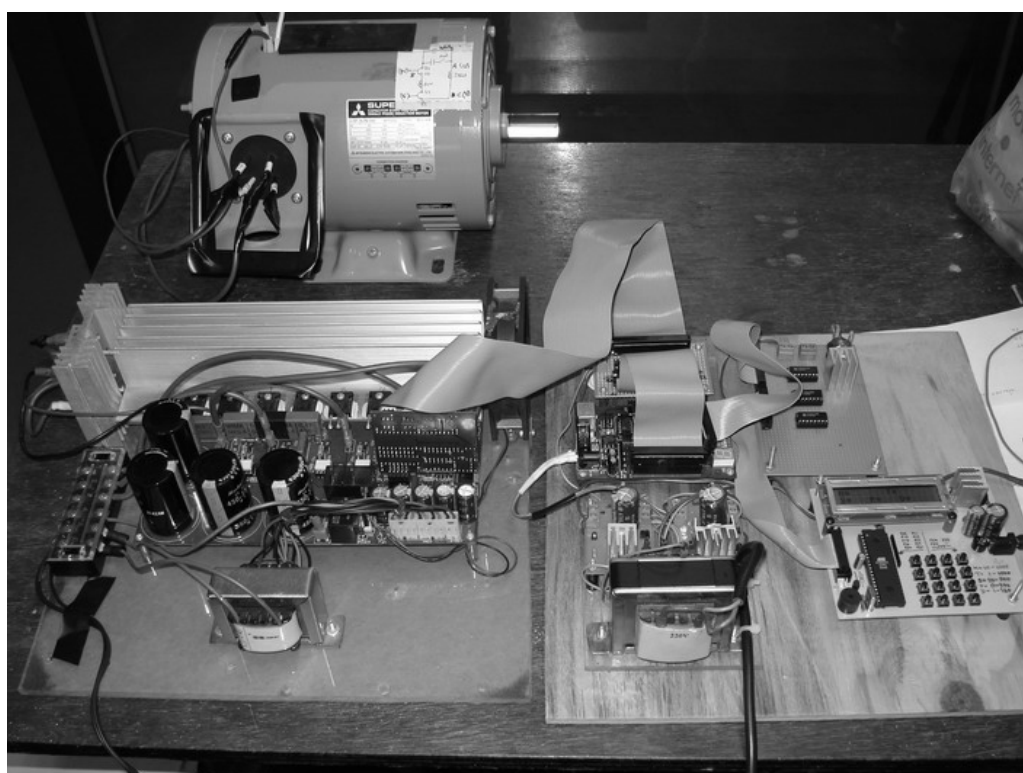
รูปที่ 5.75 Siemens Measurement and Analyzing Unit (วัดทอร์ก, วัดความเร็วรอบ, วัดกำลังที่จ่าย โหลด จากการ ทำงานของมอเตอร์)



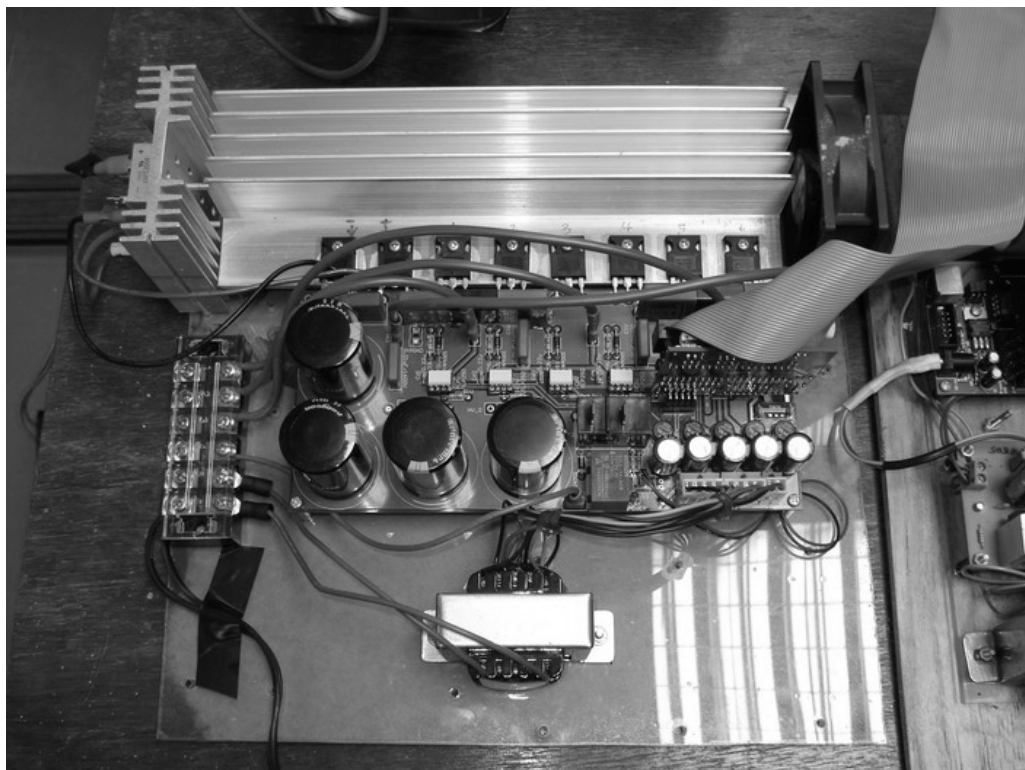
รูปที่ 5.76 การต่อ Motor เข้ากับ Generator ผ่าน Coupling



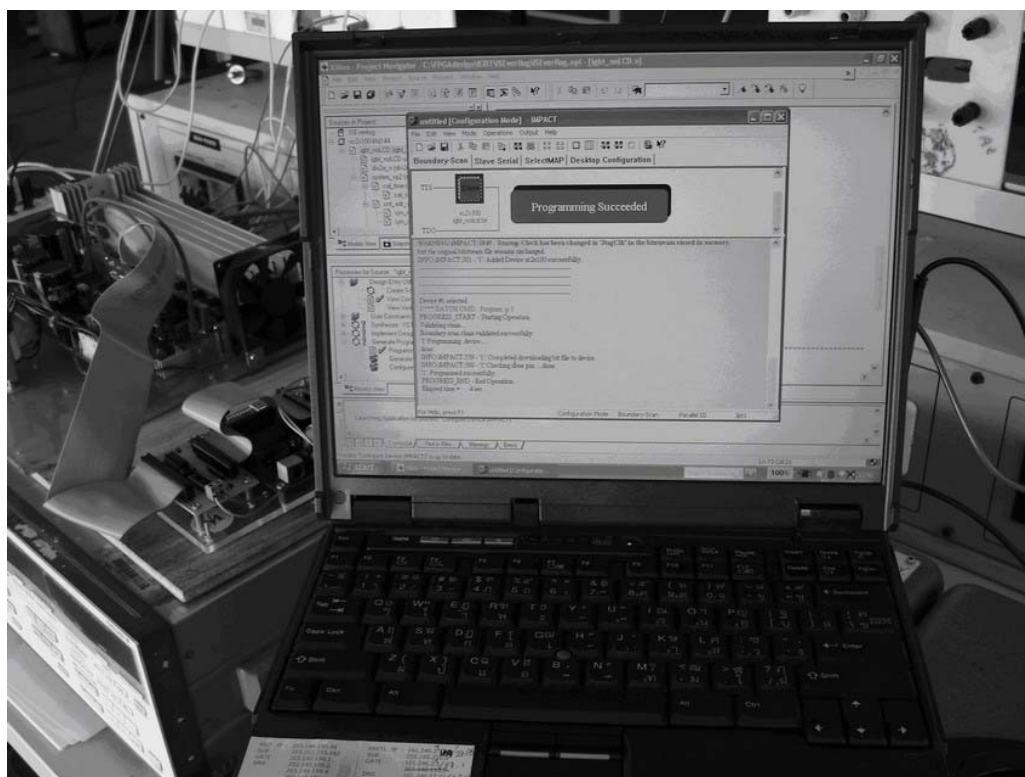
รูปที่ 5.77 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส



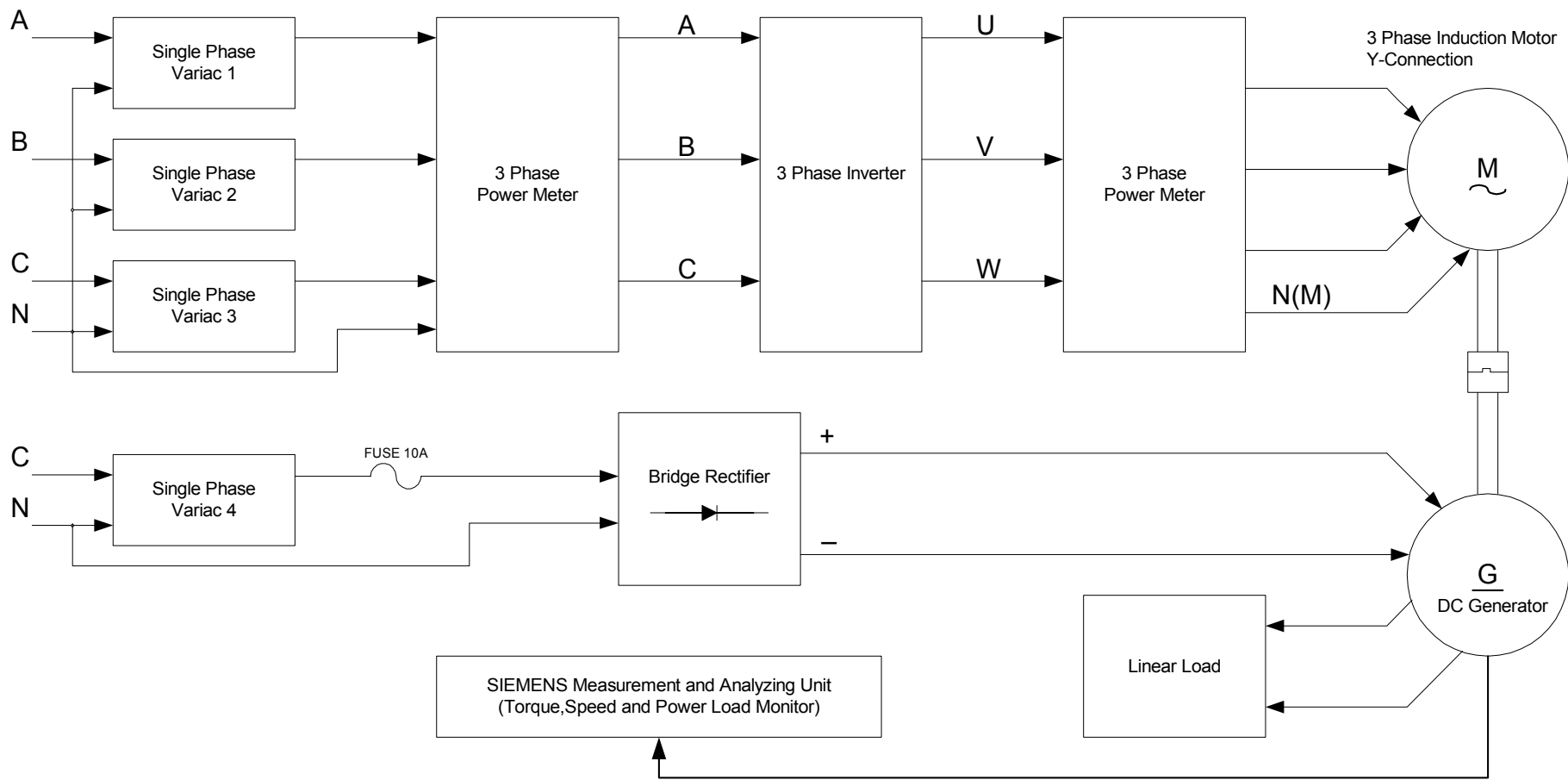
รูปที่ 5.78 ชุดควบคุมอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ที่ประกอบไปด้วย บอร์ดชุดขับ IGBT บอร์ด FPGA บอร์ดคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 5.79 บอร์ดอินเวอร์เตอร์ในส่วนของชุดสวิตช์ IGBT



รูปที่ 5.80 ภาพหน้าจอคอมพิวเตอร์ขณะทำการโปรแกรม FPGA



รูปที่ 5.81 Block Diagram การต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ตารางที่ 5.1 ตารางบันทึกผลการทดสอบแรงบิดขณะเปลี่ยน Load

No load , $f_s = 15\text{KHz}$, dead time $2\mu\text{S}$												
Command		Input			Output				Motor			
Freq(Hz)	Mod(%)	Vin(Vrms)	Iin(Arms)	Pi(KW)	V(Vrms)	I(Arms)	Po(KW)	Eff(%)	Tq(nM)	Speed	Pload(W)	Eff(%)
50	100	220	0.6	0.156	230	0.865	0.131	83.9	0.2nM	1410	20	15.26
40	80	220	0.52	0.13	206	0.85	0.104	80	0.2nM	1127	20	19.23
30	60	220	0.42	0.1	179.7	0.83	0.076	76	0.2nM	844	10	13.15
20	40	220	0.334	0.078	147.92	0.81	0.052	66.6	0.2nM	561	10	19.23
20	50	220	0.455	0.105	165.43	1.15	0.078	74.28	0.2nM	564	10	12.82
20	60	220	0.709	0.184	180.17	1.814	0.148	80.43	0.2nM	565	10	6.7
20	80	220	2.35	0.768	204.43	4.12	0.698	90.88	0.2nM	565	10	1.432
50% load , $f_s = 15\text{KHz}$, dead time $2\mu\text{S}$												
50	100	220	1.54	0.49	227.3	1.253	0.48	97.95	2.3nM	1354	320	66
40	80	220	1.4	0.44	202.36	1.27	0.4	90.9	2.3nM	1065	235	58
30	60	220	1.15	0.35	177.2	1.28	0.31	88.57	2.3nM	772	190	61.29
20	40	220	0.93	0.254	143	1.3	0.22	86.6	2.3nM	470	110	50
20	50	220	0.945	0.263	163	1.276	0.228	86.66	2.3nM	516	120	52
20	60	220	1.09	0.303	178.3	1.663	0.27	89.1	2.3nM	536	120	44
20	80	220	2.46	0.810	203.5	3.9	0.734	90.6	2.3nM	549	120	16
100% load , $f_s = 15\text{KHz}$, dead time $2\mu\text{S}$												
50	100	220	3.3	1.2	225	2.51	1.14	95	5.5nM	1225	700	61.4
40	80	220	2.89	1.016	200	2.57	0.94	92	5.5nM	917	510	54.5
30	60	220	2.5	0.87	176.7	2.979	0.81	93	5.5nM	530	290	35.8
20	40	220	1.42	0.423	141.58	2.13	0.38	89.8	3.5nM	330	120	31.57
20	50	220	1.826	0.59	161.36	2.41	0.54	91.52	5.5nM	376	210	38.88
20	60	220	1.712	0.67	176.34	2.012	0.615	91.79	5.5nM	476	260	42.27
20	80	220	2.67	0.89	201.84	3.44	0.82	92	5.5nM	520	290	35.365

ตารางที่ 5.2 ตารางบันทึกผลการทดสอบการเปลี่ยนความถี่การสวิตช์

$f_{MOTOR} = 50\text{Hz}$, $f_s = 20\text{KHz}$, dead time $2\mu S$, step = 4												
Command		Input			Output				Motor			
Load(%)	Mod(%)	Vin(Vrms)	Iin(Arms)	Pi(KW)	V(Vrms)	I(Arms)	Po(KW)	Eff(%)	Tq(nM)	Speed	Pload(W)	Eff(%)
0	100	220	0.65	0.153	233	0.785	0.12	78.4	0.2nM	1492	20	16.6
50	100	220	1.77	0.55	231	1.314	0.51	92.7	2.3nM	1419	330	64.7
100	100	220	3.6	1.28	230	2.706	1.21	94.53	5.5nM	1237	700	57.8
$f_{MOTOR} = 58.59\text{Hz}$, $f_s = 30\text{KHz}$, dead time $2\mu S$, step = 3												
Command		Input			Output				Motor			
Load(%)	Mod(%)	Vin(Vrms)	Iin(Arms)	Pi(KW)	V(Vrms)	I(Arms)	Po(KW)	Eff(%)	Tq(nM)	Speed	Pload(W)	Eff(%)
0	100	220	0.6	0.164	240.5	0.69	0.12	73.1	0.2nM	1646	30	25
50	100	220	1.84	0.620	235.5	1.378	0.565	91.1	2.3nM	1543	360	63.7
100	100	220	4.17	1.6	232.5	3.59	1.377	86	5.5nM	1140	600	43.57

ตารางที่ 5.3 ผลทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะต่อตรงกับแหล่งจ่ายไฟสลับ 3 เฟส ไม่ผ่าน Inverter

$f_{MOTOR} = 50\text{Hz}$,Direct Drive to AC Line 220V												
Command		Input			Output				Motor			
Load(%)	Mod(%)	Vin(Vrms)	Iin(Arms)	Pi(KW)	V(Vrms)	I(Arms)	Po(KW)	Eff(%)	Tq(nM)	Speed	Pload(W)	Eff(%)
0	-	220	1.071	0.15	219.6	1.013	0.15	100	0.2nM	1497	0	0
50	-	220	1.35	0.562	219.6	1.338	0.566	100	2.3nM	1447	370	65.37
100	-	220	2	1.097	219	1.99	1.0925	99.58	5.5nM	1376	750	68.64

