

บทที่ 4

การออกแบบและสร้างวงจรควบคุมและโปรแกรมระบบควบคุม

4.1 บทนำ

การออกแบบระบบควบคุมของอินเวอร์เตอร์ต่อกับกริดระบบไฟฟ้า แบ่งเป็นสองส่วนคือ ส่วนที่หนึ่ง วงจรควบคุม จะต้องใช้หน่วยประมวลผลที่มีความเร็วและสมรรถนะสูง เนื่องจากต้องทำหน้าที่หลายอย่าง เช่น ชิงโครไนซ์กับกริดระบบไฟฟ้า กำเนิดสัญญาณพีดับเบิ้ลยูเอ็ม ตรวจสอบสัญญาณแรงดัน กระแส และความเร็ว และจะต้องประมวลผลข้อมูลจากการตรวจวัดเหล่านี้ เพื่อควบคุมจ่ายกำลังไฟฟ้า ตัวประกอบกำลัง และการตรวจสอบสถานะ Islanding วงจรควบคุมจึงใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นหน่วยประมวลผลซึ่งมีฟังก์ชันการทำงานเพียงพอ ส่วนที่สองคือ โปรแกรมระบบควบคุม ใช้ภาษาซีในการเขียน โปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ เนื่องจากมีความสะดวก รวดเร็ว และพัฒนาโปรแกรมได้ง่ายกว่าภาษาแอสเซมบลี

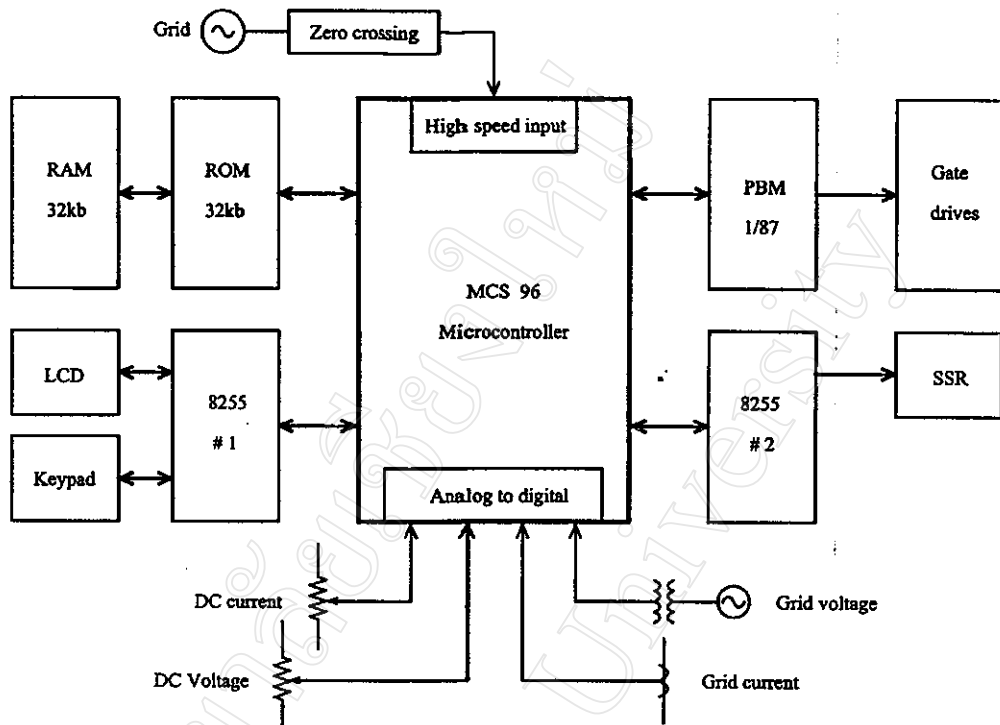
4.2 การออกแบบวงจรควบคุม

4.2.1 ส่วนประกอบวงจรควบคุม

วงจรควบคุมใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS 96 ของ Intel Corporation เป็นหน่วยประมวลผล เนื่องจากมีความเร็วและสมรรถนะสูงและมีฟังก์ชันการทำงานเพียงพอ วงจรควบคุมมีส่วนประกอบที่สำคัญดังแสดงในแผนภาพวงจรระบบควบคุมแสดงรูปที่ 4.1

วงจรระบบควบคุมมีส่วนประกอบด้านฮาร์ดแวร์ที่สำคัญ ดังต่อไปนี้

- ไมโครคอนโทรลเลอร์ MSC 96
- ชิปพีดับเบิ้ลยูเอ็ม PBM 1/87
- วงจรตรวจวัดจุดตัดศูนย์ของแรงดันกริดระบบไฟฟ้า
- วงจรตรวจวัดไฟฟ้ากระแสตรง
- วงจรตรวจวัดไฟฟ้ากระแสสลับ
- ส่วนแสดงผลและคีย์สวิตช์
- วงจรขับเคลื่อนไอจีบีที
- อินพุต / เอาต์พุต



รูปที่ 4.1 แผนภาพวงจรควบคุมอินเวอร์เตอร์

4.2.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS 96 [10]

ระบบควบคุมใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS 96 ของ Intel Corporation เป็นหน่วยประมวลผลควบคุมการทำงานทั้งหมดของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งต่อไปจะเรียกสั้น ๆ ว่า ไมโครคอนโทรลเลอร์ ใช้สัญญาณนาฬิกาความถี่ 16 เมกกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งคุณลักษณะพิเศษโดยสังเขปของไมโครคอนโทรลเลอร์คือ มีแฟมรีจิสเตอร์ (Register file) จำนวน 232 ไบต์ โดยทุกตำแหน่งสามารถใช้เป็นอุปกรณ์สะสมผลบวก (Accumulator) ขนาด 8 บิต 16 บิต และ 32 บิตได้ ทำให้การคำนวณและการโอนย้ายข้อมูลเป็นไปอย่างรวดเร็ว และมีคุณสมบัติพิเศษอีกดังต่อไปนี้

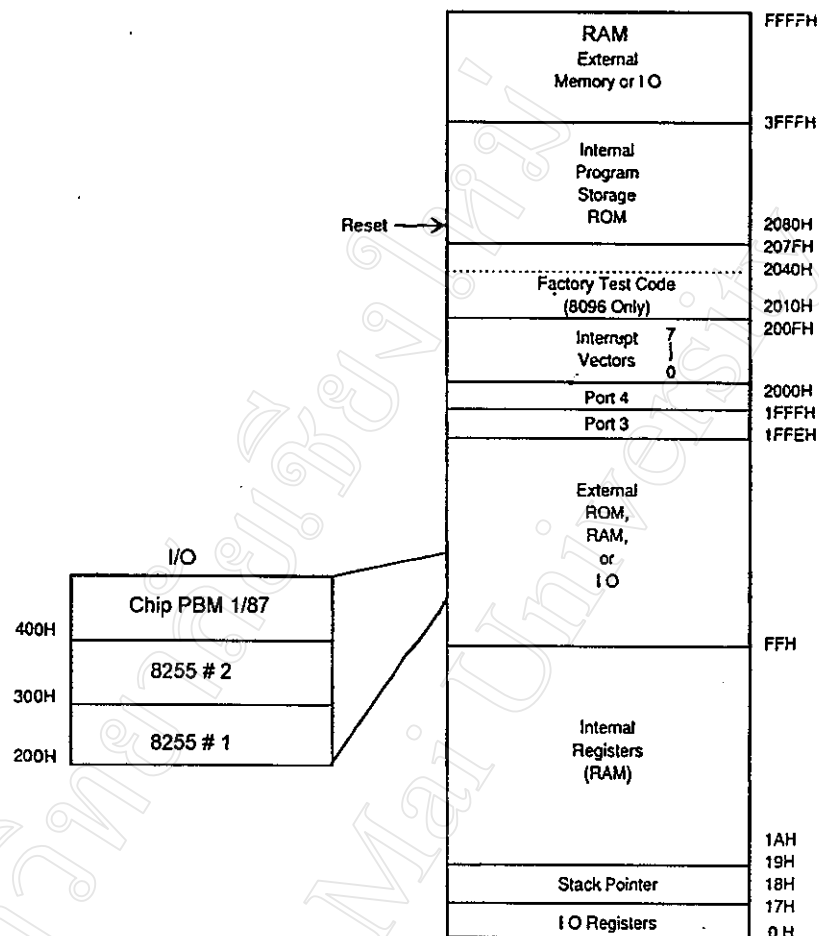
- หน่วยความจำอ่านหรือเขียน 256 ไบต์ เป็นแฟมรีจิสเตอร์และรีจิสเตอร์ฟังก์ชันพิเศษ
- หน่วยอินพุตและเอาต์พุตความเร็วสูง (High speed input/output)
- หน่วยแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล ขนาด 10 บิต จำนวน 4 ช่อง

ไมโครคอนโทรลเลอร์จะต้องเชื่อมต่อกับหน่วยความจำและอุปกรณ์ภายนอกอีกหลายอย่างที่ได้อธิบายเป็นแผนภาพในรูปที่ 4.1 การออกแบบเชื่อมต่อเพิ่มเติมมีดังต่อไปนี้

- หน่วยความจำ ROM 32 kB (แอดเดรส 2080H-3FFFH)
- หน่วยความจำ RAM 32 kB (แอดเดรส 4000H-FFFFH)
- ชิปพีคอัพเบิลยูเอ็ม PBM 1/87 (แอดเดรส 0400H-0403H)
- รับสัญญาณเชิงโครโมโซมจากกริกระบบไฟฟ้าได้ทางพอร์ต High speed input
- ชิป 8255 ตัวที่หนึ่ง เป็นพอร์ตเชื่อมต่อจอแอลซีดีและคีย์สวิตช์ (LCD and Keypad) (แอดเดรส 0200H-02FFFH)
- ชิป 8255 ตัวที่สอง เป็นพอร์ตเชื่อมต่ออินพุต/เอาต์พุต สำหรับส่งสัญญาณลอจิกเอาต์พุต เพื่อควบคุมโซลิดสเตตรีเลย์ (Solid State Relay : SSR) (แอดเดรส 0300H-03FFFH)

การจัดหน่วยความจำให้แก่ไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถอ้างอิงแอดเดรสได้ถึง 64 กิโลไบต์ พื้นที่หน่วยความจำ 0000H-00FFFH เป็นพื้นที่หน่วยความจำ RAM ที่อยู่ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ แอดเดรส 0100H-1FFFH เป็นตำแหน่งของอินพุต / เอาต์พุต แอดเดรสที่ 1FFFH-1FFFFH เป็นหมายเลขพอร์ตสามและสี่ตามลำดับ ตั้งแต่แอดเดรสที่ 2000H-2010H เป็นแอดเดรสสำหรับเวกเตอร์อินเตอร์รัปต์ (Interrupt Vector) แอดเดรสที่ 2012H-207FH เป็นแอดเดรสสงวนไว้สำหรับการทดสอบของผู้ผลิต

สำหรับแอดเดรสที่ 2080H-FFFFH เป็นแอดเดรสที่ได้ต่อขยายเพิ่มเติมสำหรับหน่วยความจำภายนอก ได้แก่ แอดเดรส 2080H-3FFFH สำหรับหน่วยความจำ ROM ขนาด 32 กิโลไบต์ และแอดเดรสที่ 4000H-FFFFH เป็นแอดเดรสสำหรับหน่วยความจำ RAM ขนาด 32 กิโลไบต์ ส่วนอินพุต/เอาต์พุตเพิ่มเติม สำหรับชิป 8255 ตัวที่หนึ่งและสอง ใช้แอดเดรสที่ 0200H และ 0300H ตามลำดับ และแอดเดรสสำหรับชิปพีคอัพเบิลยูเอ็ม (PBM 1/87) คือ แอดเดรสที่ 0400H แสดงเป็นแผนภาพพื้นที่หน่วยความจำในรูปที่ 4.2 ส่วนลายวงจรเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ของระบบควบคุมแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ค

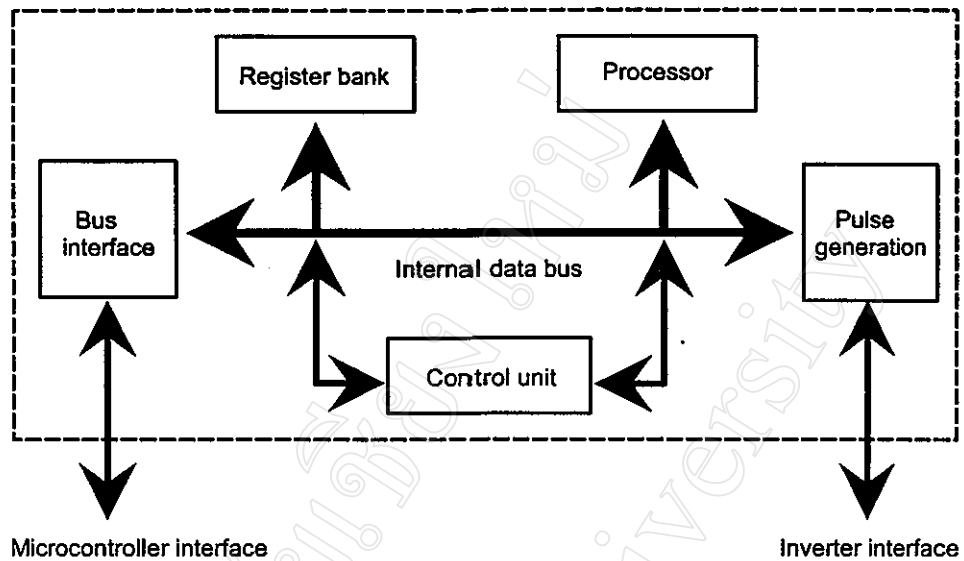


รูปที่ 4.2 แผนภาพการจัดพื้นที่หน่วยความจำของไมโครคอนโทรลเลอร์

4.2.3 ชิปปีดับเบิลยูเอ็ม

การกำเนิดสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มเพื่อไปจับเกตไอจีบีทีเพื่อสร้างแรงดันอินเวอร์เตอร์ จะกำเนิดจากชิปปีดับเบิลยูเอ็ม โดยใช้ชิปเบอร์ PBM 1/87 ของ Hanning Corporation [9] ซึ่งต่อไปจะเรียกว่า ชิปปีดับเบิลยูเอ็ม มีแผนผังโครงสร้างดังรูปที่ 4.3 รูปแบบของสัญญาณพัลส์จะได้จากการคำนวณภายในตัวชิปเอง ต้องการตัวแปรของแรงดัน และความถี่ ที่เป็นอิสระต่อกัน โดยรับคำสั่งและตัวแปรต่างๆ จากไมโครคอนโทรลเลอร์ ความถี่ของการสวิตช์ทำได้สูงสุด 18 kHz

ชิปปีดับเบิลยูเอ็มติดต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ 8 บิต โดยผ่านคำรีจิสเตอร์ ขนาด 16 บิต จำนวน 2 ตัว ซึ่งตัวแรกทำหน้าที่เป็น Address และ Control Register มีรูปแบบ Control word ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ส่วนในตัวที่สองเป็น Data Register ทำหน้าที่ส่งผ่านข้อมูลระหว่างรีจิสเตอร์ภายในกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ข้อมูลที่ถูกเขียนไปใน Register Bank มีความอิสระต่อกันทุกตำแหน่ง ตำแหน่งต่างๆ คือ WAD3...0 ดังแสดงในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.3 แผนผังโครงสร้างชิปพีดีบีเบิลยูเอ็ม [9]

การส่งข้อมูลจากไมโครคอนโทรลเลอร์ไปยังชิปพีดีบีเบิลยูเอมนั้นจะต้องตรวจสอบว่าชิปพีดีบีเบิลยูเอ็มกำลังคำนวณอยู่หรือไม่ โดยนำบิตที่สองของ Control Register มาตรวจสอบถ้าหากมีค่าเป็นหนึ่ง แสดงว่าชิปพีดีบีเบิลยูเอ็มกำลังคำนวณอยู่จะไม่สามารถส่งข้อมูลจากไมโครคอนโทรลเลอร์เข้าไปได้ แต่ถ้าเป็นศูนย์สามารถส่งข้อมูลเข้าไปได้ ในการตรวจสอบสถานะการทำงานของตัวชิปทำได้โดยการอ่านค่าจาก Control Register ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.1 รูปแบบบิตข้อมูล Control word ของชิปพีดีบีเบิลยูเอ็ม

Bit	Name	Function
0	EIN	pulse logic start/stop
1	IINT	current sign mode
2	IINT1	inverter leg 1current sign mode
3	IINT2	inverter leg 2current sign mode
4	IINT3	inverter leg 3current sign mode
5		Not used
6	TESTFL	used for test
7	BUS16	select the 8 or 16 bit mode
8-11	WAD0...3	write address
12-13	RAD0...1	read address
14	RDSTART	read start bit
15		Not used

ตารางที่ 4.2 ตำแหน่งการเขียนบิตลงไปใน Register bank ข้อมูลขนาด 16 บิต

WAD3..0	Name	Function
0000(0)	UA	UA voltage component
0001(1)	UB	UB voltage component
0010(2)	PHI1	phase angle, upper half word
0011(3)	DPHI1	frequency, upper half word
0100(4)	PHI0	phase angle, lower half word
0101(5)	DPHI0	frequency, lower half word
0110(6)	PHIADD	additional phase angle
0111(7)		not used
1000(8)	T_{aus}	switch off time
1001(9)	T_{tot}	dead time
1010(10)	T_{min}	minimum switching on time
1011(11)	VORTL	switching frequency parameter
1100(12)	TSTART	calculation star up
(13)-(15)		not used

ตารางที่ 4.3 รูปแบบบิตข้อมูล Status word ของชิปพีดีบีเบิลยูเอ็ม

Bit	Name	Function
0	WRFLAG	write flag
1	RDFLAG	read flag
2	CALCLFAG	calculation flag
3-15		Not used

ข้อมูลแรงดันเอาต์พุตเป็นข้อมูลขนาด 16 บิตที่ค่าตั้งแต่ 0000H - 7CCCH การกำหนดค่าแรงดันเอาต์พุต(อาร์เอ็มเอส) ที่ต้องการ กำหนดโดยเขียนค่าไปยังรีจิสเตอร์ข้อมูล UA ซึ่งรูปแบบขนาดแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากสมการที่ 4.1

$$UA = UA_{15...0} / 8000H \quad (4.1)$$

ข้อมูลความถี่แรงดันเอาต์พุต เป็นข้อมูลขนาด 32 บิต ประกอบด้วย DPHI1 และ DPHI0 โดยทั้งสองเป็นข้อมูลแบบ 16 บิต รูปแบบข้อมูลความถี่แรงดันเอาต์พุตได้จากสมการที่ 4.2

$$DPHI_{11...0} \times 2^{12} + DPHI0_{15...4} = 3 \times 2^{34} \times n_{vor} \times f_{out} / f_{clk} \quad (4.2)$$

เมื่อ f_{out} เป็นความถี่แรงดันเอาต์พุต หน่วย เฮิร์ตซ์ f_{clk} เป็นความถี่สัญญาณนาฬิกา หน่วย เฮิร์ตซ์ และ n_{vor} เป็น prescaling factor เท่ากับ $VORLT + 1$ สำหรับในกรณีนี้ใช้ความถี่สัญญาณนาฬิกา 16 เมกกะเฮิร์ตซ์ เมื่อกำหนด $n_{vor} = VORLT + 1 = 1$ นั่นคือความถี่การสวิตช์ จะมีค่าเป็น 15.625 กิโลเฮิร์ตซ์

ค่าคงที่อื่น ๆ ที่จำเป็นต้องเขียนให้ชิปพีคดับเบิลยูเอ็มคือ T_{aus} T_{tot} T_{min} $VORLT$ $TSTART$ โดยคำนวณจากสมการที่ 4.3 ถึง 4.7 ตามลำดับ

$$T_{aus} = TAUS_{5...0} \times n_{vor} / f_{clk} \quad (4.3)$$

$$T_{tot} = TTOT_{5...0} \times n_{vor} / f_{clk} \quad (4.4)$$

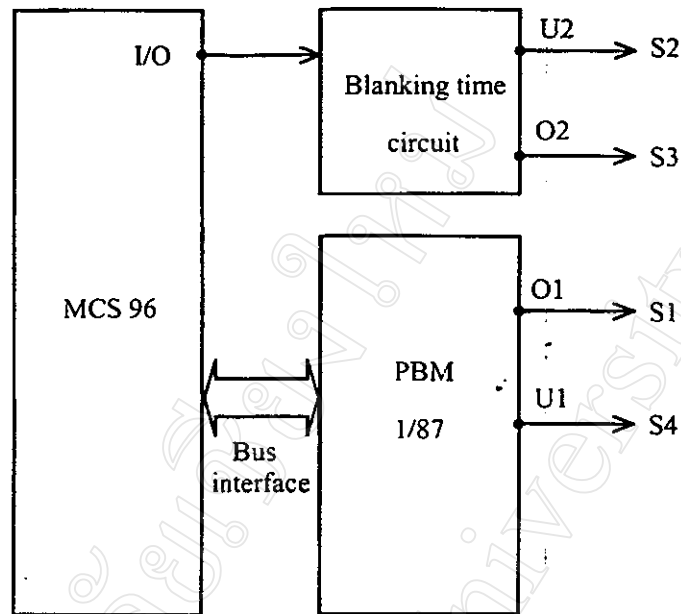
$$T_{min} = 2TMIN_{5...0} \times n_{vor} / f_{clk} \quad (4.5)$$

$$n_{vor} = VORLT_{4...0} + 1 \quad (4.6)$$

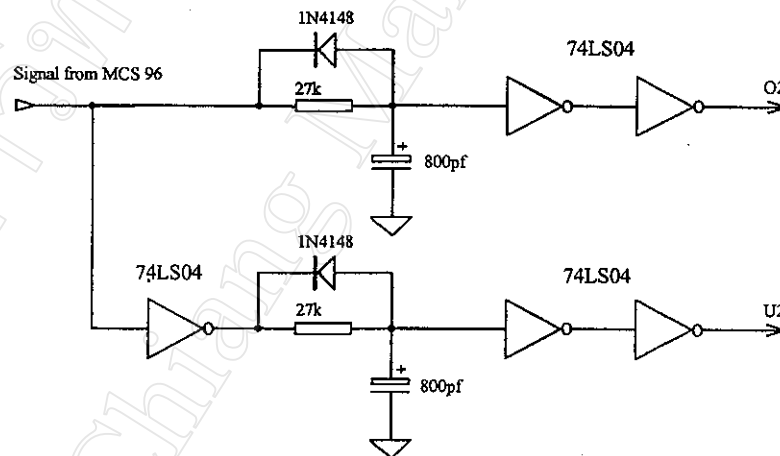
$$f_{schalt} = f_{clk} / (n_{vor} \times 1024) \quad (4.7)$$

$$TSTART = \text{int}(512 - 322/(VORLT+1)) \quad (4.8)$$

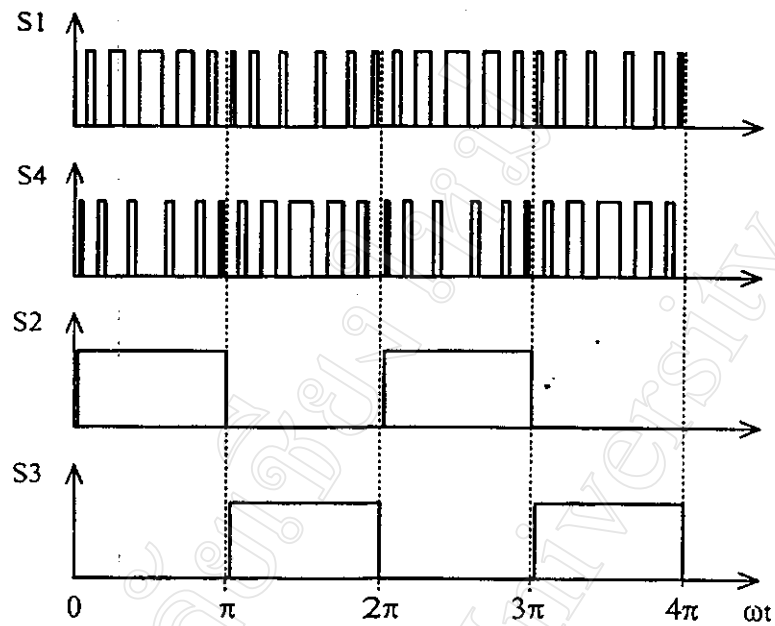
ชิปพีคดับเบิลยูเอ็มนี้ออกแบบสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยเฉพาะ การประยุกต์ใช้งานกับอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว สัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มจะต้องกำเนิดโดยตรงจากไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วย จึงจะได้สัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มแบบเฟสเดียวที่สมบูรณ์ แผนภาพการต่อชิปพีคดับเบิลยูเอ็มกับไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงในรูปที่ 4.4 สัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มที่ได้แสดงในรูปที่ 4.6 สัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มที่ได้มีสัญญาณ มีช่วงเวลา blanking time ประมาณ 3 ไมโครวินาที สัญญาณที่กำเนิดจากไมโครคอนโทรลเลอร์ต้องมีการปรับช่วงเวลา blanking time ด้วยวงจรปรับช่วงเวลา blanking time แสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 แผนภาพการเชื่อมต่อชิปพีดีบีเบิลยูเอ็มและไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อสร้างสัญญาณเกิด



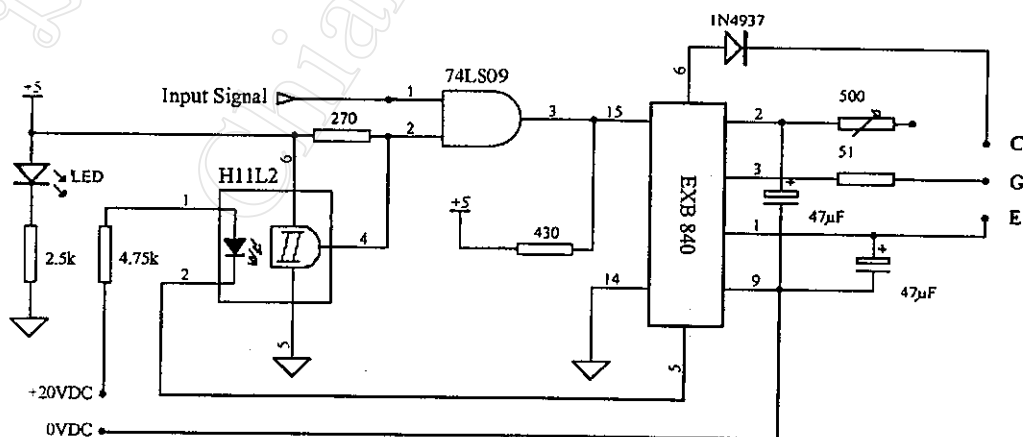
รูปที่ 4.5 วงจรปรับช่วงเวลา blanking time



รูปที่ 4.6 สัญญาณพีคดับเบิ้ลยูเอ็มสี่สัญญาณที่นำไปต่อกับวงจรขับเคลื่อน

4.2.4 วงจรขับเคลื่อนไอจีบีที [8]

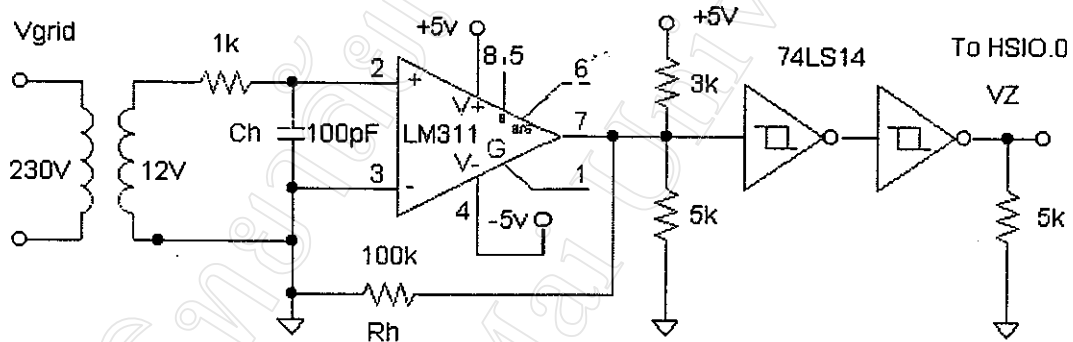
วงจรขับเคลื่อนเป็นแบบไฮบริด (Hybrid IC drive) เบอร์ EXB 840 ของ Fuji Electric [7] ออกแบบเพื่อขับเคลื่อนไอจีบีทีโดยเฉพาะ วงจรขับเคลื่อนออกแบบตามข้อกำหนดของผู้ผลิตแสดงดังรูปที่ 4.7 รับสัญญาณอินพุตแบบ TTL ความถี่การสวิตช์สูงสุด 40 kHz สัญญาณขับเคลื่อนมีระดับแรงดัน +15 และ -5 โวลต์



รูปที่ 4.7 วงจรขับเคลื่อนไอจีบีที สำหรับ 1 ตัว

4.2.5 วงจรตรวจวัดจุดตัดศูนย์แรงดันกริกระบบไฟฟ้า

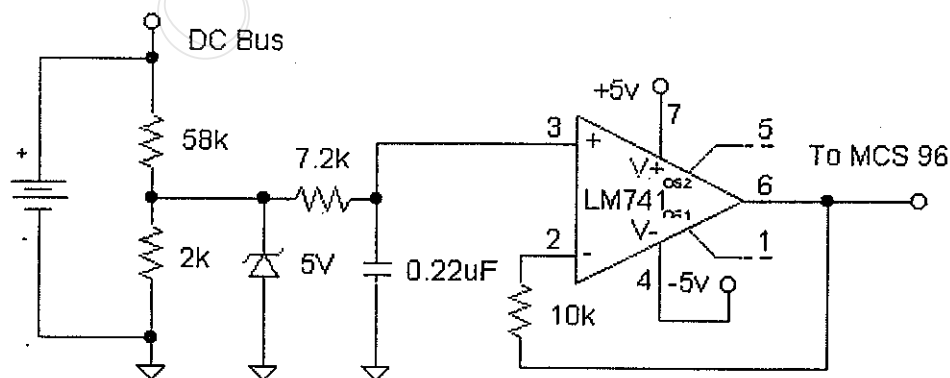
แรงดันกริกระบบไฟฟ้าจะต้องถูกตรวจวัดจุดตัดศูนย์ เพื่อเป็นมุมเฟสอ้างอิงที่ศูนย์องศา สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ สัญญาณจุดตัดศูนย์จะต่อเข้ากับ HSI.0 (high speed input) ของไมโครคอนโทรลเลอร์ช่องศูนย์ วงจรตรวจวัดจุดตัดศูนย์ออกแบบโดยใช้ LM311 เป็นตัวเปรียบเทียบแรงดัน สามารถปรับฮิสเทอรีซิสได้ด้วยตัวต้านทาน R_h และตัวเก็บประจุ C_h ซึ่งจะต้องทดสอบโดยต่อใช้งานจริงเพื่อหาค่า R_h และ C_h เพื่อให้ได้สัญญาณที่เหลี่ยมที่ดีที่สุดไม่มีสัญญาณรบกวน ไมโครคอนโทรลเลอร์จากการสวิตช์ของไอจีบีที วงจรตรวจวัดจุดตัดศูนย์แรงดันกริกระบบไฟฟ้าแสดงในรูป 4.8



รูปที่ 4.8 วงจรตรวจวัดจุดตัดศูนย์แรงดันกริกระบบไฟฟ้า

4.2.6 วงจรตรวจวัดแรงดันกระแสตรง

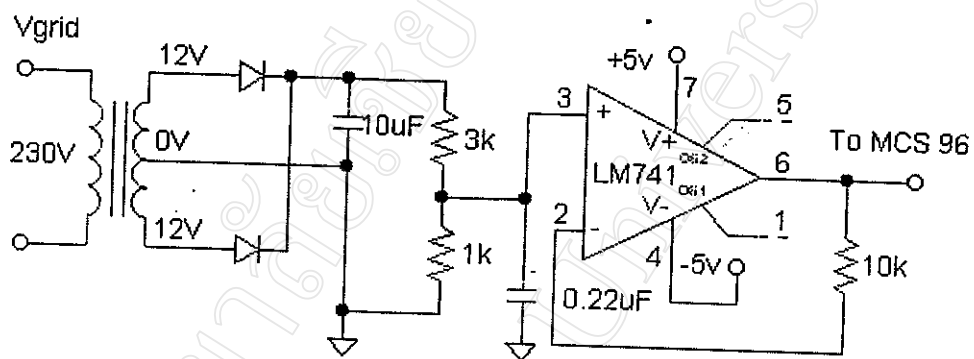
วงจรตรวจวัดแรงดันกระแสตรง ซึ่งเป็นแรงดันอินพุต ออกแบบโดยลดทอนแรงดันด้วยตัวต้านทาน จากแรงดัน 80-150 โวลต์ ลดทอนเป็น 2-4.5 โวลต์ แล้วผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านผ่านวงจรขยายโดยใช้อปแอมป์ แล้วเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ แสดงวงจรในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 วงจรตรวจวัดแรงดันกระแสตรง

4.2.7 วงจรตรวจวัดแรงดันกริดระบบไฟฟ้า

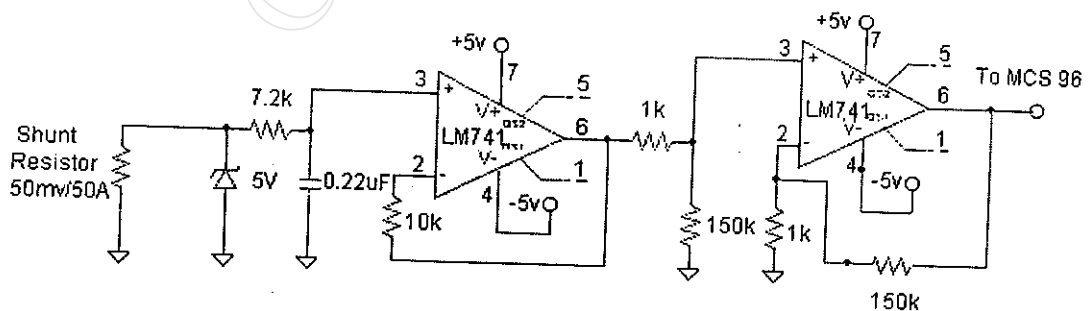
วงจรตรวจวัดแรงดันกริดระบบไฟฟ้า ซึ่งตรวจวัดค่าแรงดันกระแสสลับที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์ ออกแบบโดยใช้หม้อแปลงลดแรงดันจาก 230 โวลต์ เป็นแรงดันมีจุดต่อกลาง 12-0-12 โวลต์ ผ่านไดโอดเรียงกระแส ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน และขยายสัญญาณโดยใช้อปแอมป์ และเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ แสดงวงจรในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 วงจรตรวจวัดแรงดันกริดระบบไฟฟ้า

4.2.8 วงจรตรวจวัดกระแสไฟตรง

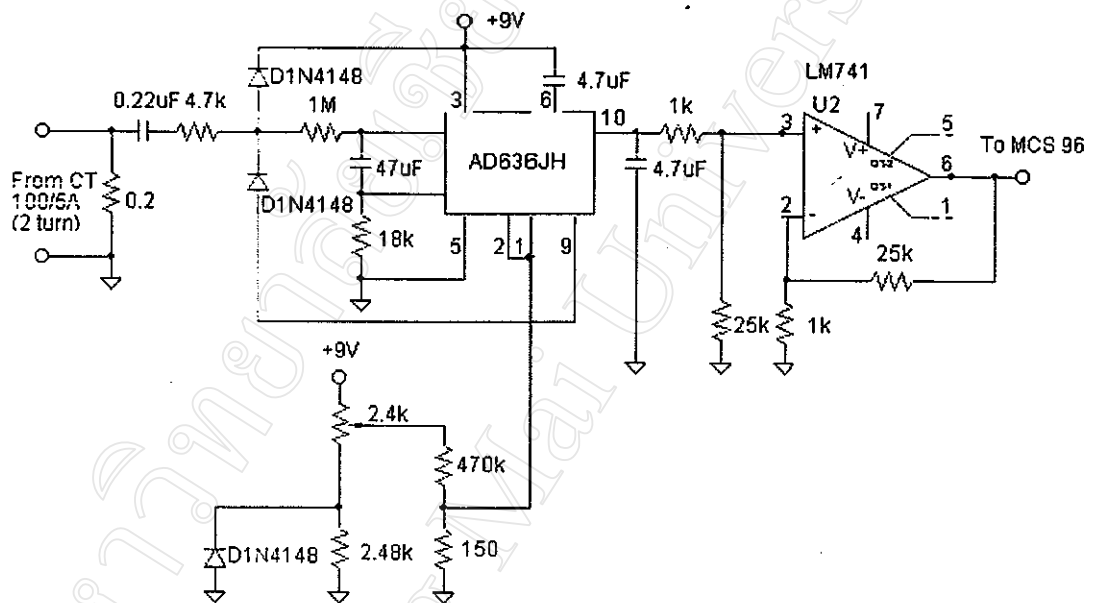
วงจรตรวจวัดกระแสไฟตรง ซึ่งเป็นกระแสด้านอินพุต ใช้หลักการแรงดันตกคร่อม ตัวต้านทานแปรผันตามกระแสที่ไหลผ่าน โดยใช้ตัวต้านทานขนาน (Shunt Resistor) สำหรับวัดกระแสนาค 50 มิลลิโวลต์ต่อ 50 แอมแปร์ แล้วผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน และวงจรขยายโดยใช้อปแอมป์ และจึงเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ แสดงวงจรในรูป 4.11



รูปที่ 4.11 วงจรตรวจวัดกระแสไฟตรง

4.2.9 วงจรตรวจวัดกระแสกรัดระบบไฟฟ้า

วงจรตรวจวัดกระแสกรัดระบบไฟฟ้า ใช้หม้อแปลงกระแสขนาด 100/5 เป็นตัวตรวจวัด และลดขนาดกระแสเป็นไม่เกิน 200 มิลลิโวลต์ ผ่านวงจรความถี่ต่ำผ่าน ผ่านวงจรวัดค่าอาร์เอ็มเอส โดยใช้วงจรรวมเฉพาะงาน AD636JH[4] (แสดงรายละเอียดทางเทคนิคในภาคผนวก ข) เพื่อแปลงเป็นค่าสัญญาณแอนะล็อกกระแสตรงที่เป็นค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสกรัดระบบไฟฟ้า แล้วจึงผ่านวงจรขยายโดยใช้ออปแอมป์ให้สูงขึ้นและเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ แสดงวงจรในรูป 4.12



รูปที่ 4.12 วงจรตรวจวัดกระแสกรัดระบบไฟฟ้า[4]

4.3 แนวคิดและหลักการออกแบบโปรแกรมระบบควบคุม

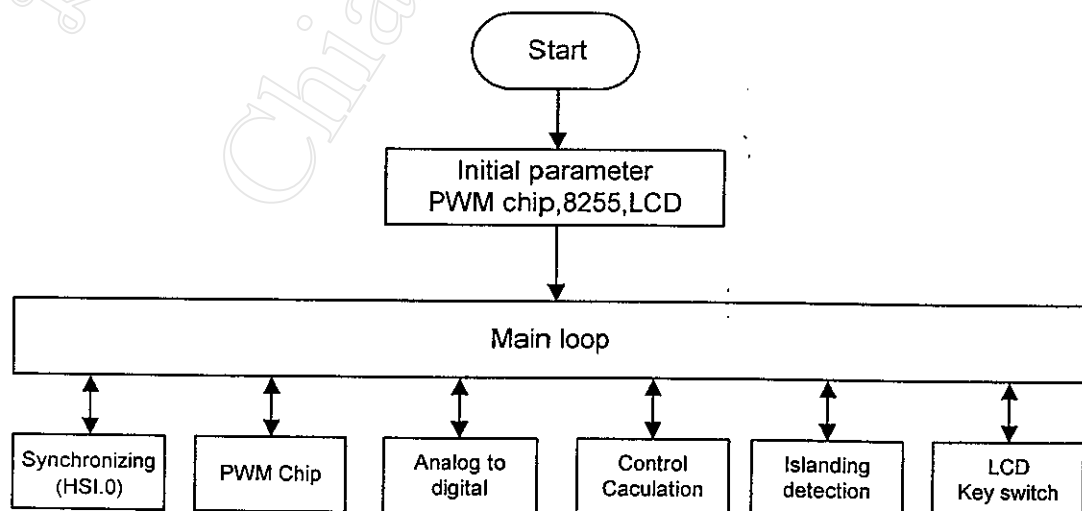
ระบบควบคุมประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งมีลำดับขั้นตอนที่แน่นอน โดยโปรแกรมไว้ในหน่วยความจำ โปรแกรมระบบควบคุมจะต้องพัฒนาให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานที่ต้องการและมีสมรรถนะที่เชื่อถือได้ การพัฒนาโปรแกรมจึงต้องมีเครื่องมืออุปกรณ์และซอฟต์แวร์ที่ใช้งานง่าย สะดวกและรวดเร็ว ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ ภาษาซี Micro C ของ Dave Dunfiled [4] สำหรับเขียนโปรแกรม เนื่องจากภาษาซีเป็นภาษาโครงสร้างทำให้การพัฒนาโปรแกรมง่ายขึ้น โดยเฉพาะโปรแกรมที่มีการทำงานซับซ้อน การแก้ไขหรือพัฒนาโปรแกรมไม่ยุ่งยากเหมือนภาษาแอสเซมบลี แต่การเขียนด้วยภาษาซีข้อดีคือกว่าในเรื่องของความเร็วซึ่งจะทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลช้ากว่าการเขียนด้วยภาษาแอสเซมบลี จากการทดสอบโปรแกรมสำหรับระบบควบคุมในวิทยานิพนธ์นี้ พบว่ามีความเร็วในการประมวลผลเพียงพอ

4.3.1 โครงสร้างโปรแกรมระบบควบคุม

ระบบควบคุมใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผล และควบคุมการทำงานทั้งหมด ไมโครคอนโทรลเลอร์ มีหน้าที่สำคัญ 6 ประการคือ

- 1) โปรแกรมซิงโครไนซ์กับกริดระบบไฟฟ้าที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์
- 2) โปรแกรมควบคุมซิปพีดับเบิ้ลยูเอ็ม ให้กำเนิดสัญญาณพีดับเบิ้ลยูเอ็ม
- 3) โปรแกรมตรวจวัดค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้า กระแสสลับและกระแสตรง
- 4) โปรแกรมคำนวณควบคุมกำลังไฟฟ้า และตัวประกอบกำลัง
- 5) โปรแกรมตรวจสอบสถานะ Islanding
- 6) โปรแกรมติดต่อหน่วยแสดงผลและรับคำสั่ง ได้แก่ จอแอลซีดี และคีย์สวิตช์

โครงสร้างโปรแกรมระบบควบคุมแสดงเป็นแผนภาพกรอบในรูปที่ 4.13 ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์มีหน้าที่การทำงานหลัก 6 ประการ ซึ่งจะต้องจัดแบ่งเวลาหน้าที่ต่าง ๆ ให้เหมาะสมในแต่ละไซเคิลเมื่อซิงโครไนซ์กับกริดระบบไฟฟ้า การซิงโครไนซ์กับกริดระบบไฟฟ้า เป็นหน้าที่สำคัญอันดับหนึ่งแต่การโปรแกรมไม่ได้ใช้ฟังก์ชันอินเตอร์รัพต์ของไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังนั้นทำให้การโปรแกรมค่อนข้างยุ่งยาก ซับซ้อน เนื่องจากจะต้องจัดเวลาให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำหน้าที่ทุก ๆ อย่างได้เพียงพอและไม่ก่อให้เกิดปัญหาซิงโครไนซ์ผิดพลาด เพื่อไม่ให้เกิดกรณีดังกล่าวจึงต้องจัดแบ่งช่วงเวลาการทำงานต่าง ๆ ให้มีช่วงเริ่มต้นและสิ้นสุดที่แน่นอน โดยใช้ขอบข่ายของสัญญาณซิงโครไนซ์เป็นตัวอ้างอิง



รูปที่ 4.13 แผนภาพกรอบโครงสร้างโปรแกรมระบบควบคุม

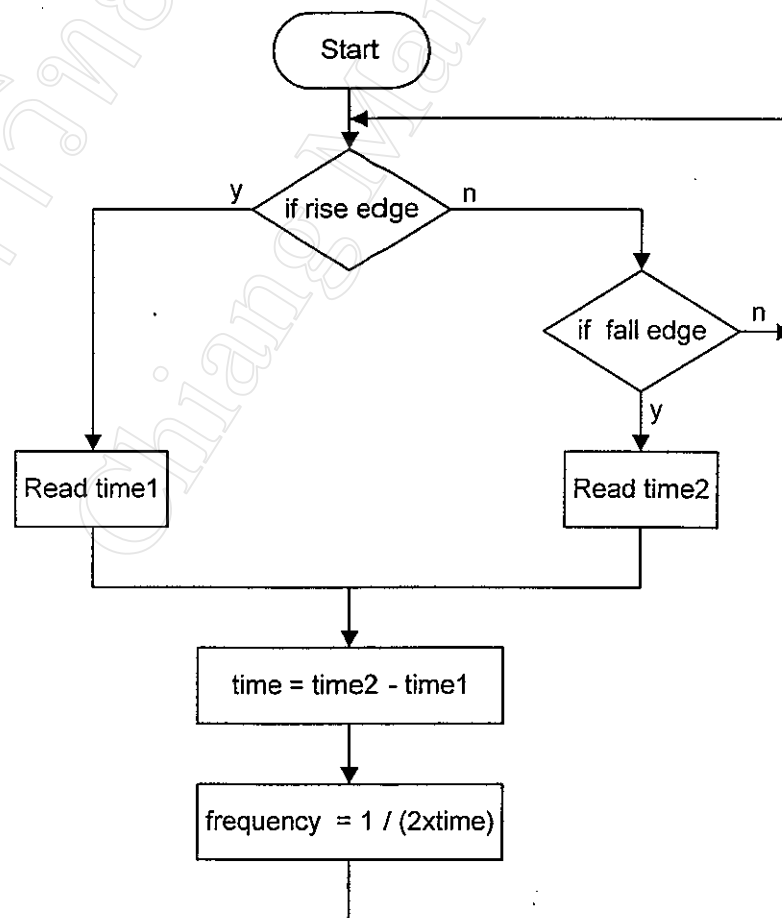
กล่าวคือเมื่อสแกนพบขอขำขึ้นของสัญญาณชิงโครไนซ์ แล้วจึงประมวลการทำงาน หน้าที่อื่น ๆ ต่อไปไม่เกิน 10 มิลลิวินาที หลังจากนั้นต้องกลับมาสแกนหาขอขำลงของสัญญาณ ชิงโคร ไนซ์อีก เมื่อพบขอขำลงแล้วจึงให้ทำงานอย่างอื่นต่อไปไม่เกิน 10 มิลลิวินาที เพื่อกลับ หาสแกนหาขอขำขึ้นของสัญญาณชิงโครไนซ์เป็นรอบการทำงานอย่างนี้ตลอดไป ดังนั้นจะต้อง จัดลำดับขั้นตอนเหมาะสมเพื่อให้มีความเชื่อถือได้สูง จากแผนผังโครงสร้างโปรแกรมระบบ ควบคุม รูปที่ 4.13 ในเวลาหนึ่งวินาทีซึ่งมีจำนวน 50 ไซเคิล ไมโครคอนโทรลเลอร์จะจัดแบ่งการ ประมวลผลในหน้าที่ต่าง ๆ ในแต่ละวินาที ดังต่อไปนี้

- 1) ทุกไซเคิล ตรวจวัดขอขำขึ้นของสัญญาณชิงโครไนซ์
- 2) ทุกไซเคิล ตรวจวัดขอขำลงของสัญญาณชิงโครไนซ์
- 3) ทุกไซเคิล คำนวณความถี่ของสัญญาณชิงโครไนซ์
- 4) ทุกไซเคิล ติดต่อกับชิปพีดีบีเบิลยูเอ็ม
- 5) ทุกไซเคิล Passive Method
- 6) ไซเคิลที่ 9 สแกนคีย์สวิตช์
- 7) ไซเคิลที่ 14 แปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล (แรงดันกริดระบบไฟฟ้า)
- 8) ไซเคิลที่ 15 แปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล (แรงดันกระแสตรง)
- 9) ไซเคิลที่ 16 แปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล (กระแสอินพุต)
- 10) ไซเคิลที่ 17 แปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล (กระแสกริดระบบไฟฟ้า)
- 11) ไซเคิลที่ 18 สแกนคีย์สวิตช์
- 12) ไซเคิลที่ 19-22 คำนวณ MPPT control
- 13) ไซเคิลที่ 23-26 คำนวณ PF control
- 14) ไซเคิลที่ 27 สแกนคีย์สวิตช์
- 15) ไซเคิลที่ 28-35 ติดต่อจอแอลซีดี
- 16) ไซเคิลที่ 36 สแกนคีย์สวิตช์
- 17) ไซเคิลที่ 37-40 ติดต่อจอแอลซีดี
- 18) ไซเคิลที่ 45 สแกนคีย์สวิตช์
- 19) ไซเคิลที่ 47-50 ติดต่อจอแอลซีดี

4.3.2 โปรแกรมตรวจวัดสัญญาณเชิงโครไนซ์ และความถี่

ระบบควบคุมจะต้องซิงโครไนซ์กับกริดระบบไฟฟ้าที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นการทำงานสำคัญที่สุดของไมโครคอนโทรลเลอร์ ไมโครคอนโทรลเลอร์มีพอร์ตอินพุตความเร็วสูง (High speed input) ซึ่งมีอยู่ 4 อินพุต คือ HIS.0 - HIS.3 มีความเร็วในการตรวจจับสูงถึง 2 ไมโครวินาที ซึ่งเพียงพอสำหรับตรวจวัดสัญญาณเชิงโครไนซ์ที่ 50 เฮิร์ตซ์ จากการโปรแกรมและทดสอบวิธีสแกนขอบขาขึ้นและขอบขาลงของสัญญาณเชิงโครไนซ์ (V_Z) ด้วยพอร์ตอินพุตความเร็วสูงได้

การตรวจวัดสัญญาณเชิงโครไนซ์โดยใช้พอร์ตอินพุตความเร็วสูงพอร์ต HIS.0 เพียงพอร์ตเดียว โดยอ่านหรือสแกนข้อมูลจากแอสแอดเรส 0006H เก็บไว้ในตัวแปร INTP (Interrupt) เมื่อเป็นขอบขาขึ้นจะอ่านค่าเวลาจากแอสแอดเรส 000AH เก็บไว้ในตัวแปร time1 ถ้าเป็นขอบขาลงจะอ่านค่าเวลาเก็บไว้ในตัวแปร time2 ผลต่างของเวลา time2 และ time1 ที่ได้เป็นคาบเวลาครึ่งไซเคิลของสัญญาณเชิงโครไนซ์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2,500 หน่วยต่อคาบเวลา 10 มิลลิวินาที สามารถแปลงหน่วยให้เป็นความถี่ด้วยส่วนกลับของเวลา แสดงผังผังโปรแกรมตรวจวัดสัญญาณและความถี่ในรูปที่ 4.14

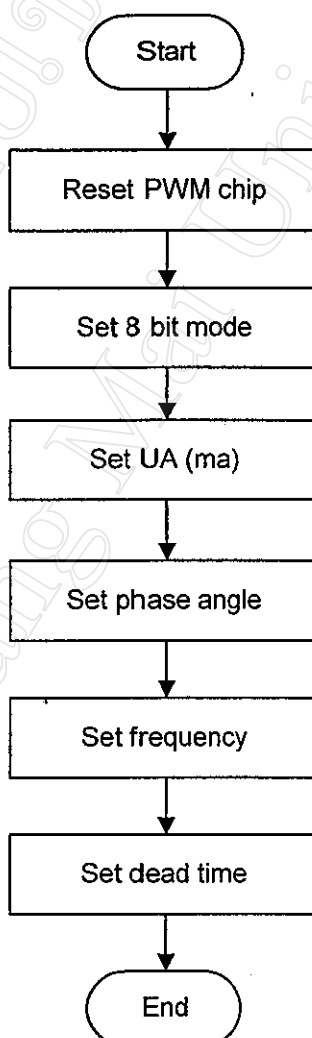


รูป 4.14 ผังผังโปรแกรมตรวจวัดสัญญาณเชิงโครไนซ์และคำนวณความถี่

4.3.3 โปรแกรมควบคุมชิปพีดับเบิลยูเอ็ม

4.3.3.1 โปรแกรมกำหนดค่าเริ่มต้นชิปพีดับเบิลยูเอ็ม

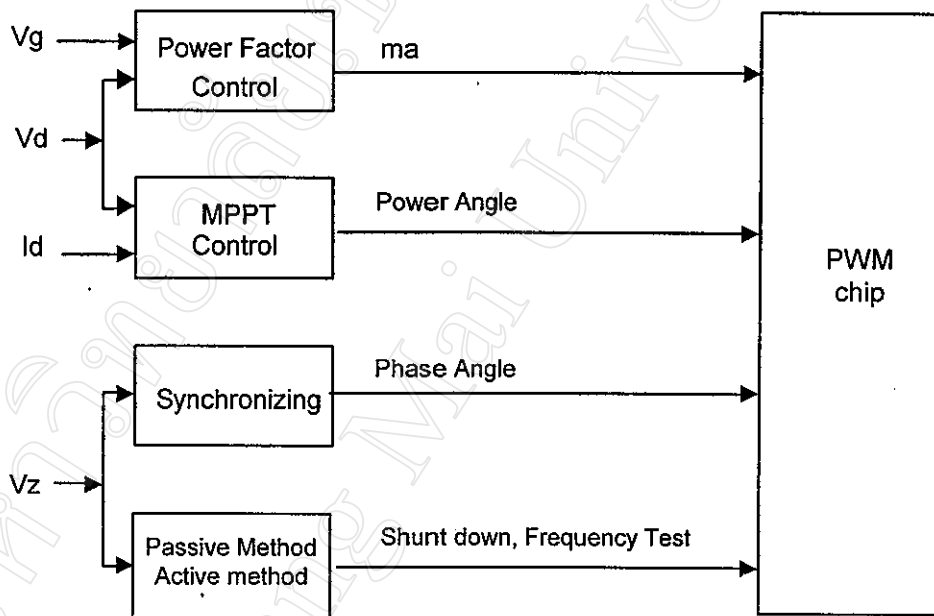
ชิปพีดับเบิลยูเอ็มจะต้องมีการกำหนดค่าเริ่มต้นทุกครั้งที่มีการใช้งาน โดยจะต้องรีเซ็ตชิป พีดับเบิลยูเอ็มด้วยสัญญาณลอจิกจากชิป 8255 ตัวที่สอง แล้วจึงส่งข้อมูลต่าง ๆ ให้แก่ชิปพีดับเบิลยูเอ็มได้แก่ กำหนดการติดต่อแบบ 8 บิต กำหนดค่าดัชนีมอดูเลต (ma) กำหนดโดยส่งข้อมูลเป็นค่า UA ของชิปพีดับเบิลยูเอ็ม กำหนดค่ามุมเฟส กำหนดค่าความถี่แรงดันเอาต์พุต และกำหนดค่า dead time แสดงในแผนผังรูป 4.15



รูป 4.15 แผนผังโปรแกรมกำหนดค่าเริ่มต้นชิปพีดับเบิลยูเอ็ม

4.3.3.2 โปรแกรมส่งข้อมูลชิปพีดับเบิลยูเอ็ม

เมื่ออินเวอร์เตอร์ต่อกับกริดระบบไฟฟ้า จะต้องส่งข้อมูลให้ชิปพีดับเบิลยูเอ็มทุกไซเคิล ได้แก่ มุมเฟส และมุมกำลัง ข้อมูลค่าดัชนีมอดูเลตจะได้จากผลการคำนวณจากโปรแกรมควบคุม ตัวประกอบกำลัง คำสั่งหยุดกำเนิดสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มจะได้จากการตรวจสอบพบสถานะ Islanding หรือการหยุดทำงานของอินเวอร์เตอร์ (ส่วนการทดสอบโดยปรับความถี่แรงดันเอาต์พุต ชิปพีดับเบิลยูเอ็มจะได้รับข้อมูลความถี่ ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ยังมิได้ เขียนโปรแกรมและทดสอบ) แผนภาพกรอบการส่งข้อมูลให้ชิปพีดับเบิลยูเอ็มแสดงในรูปที่ 4.16



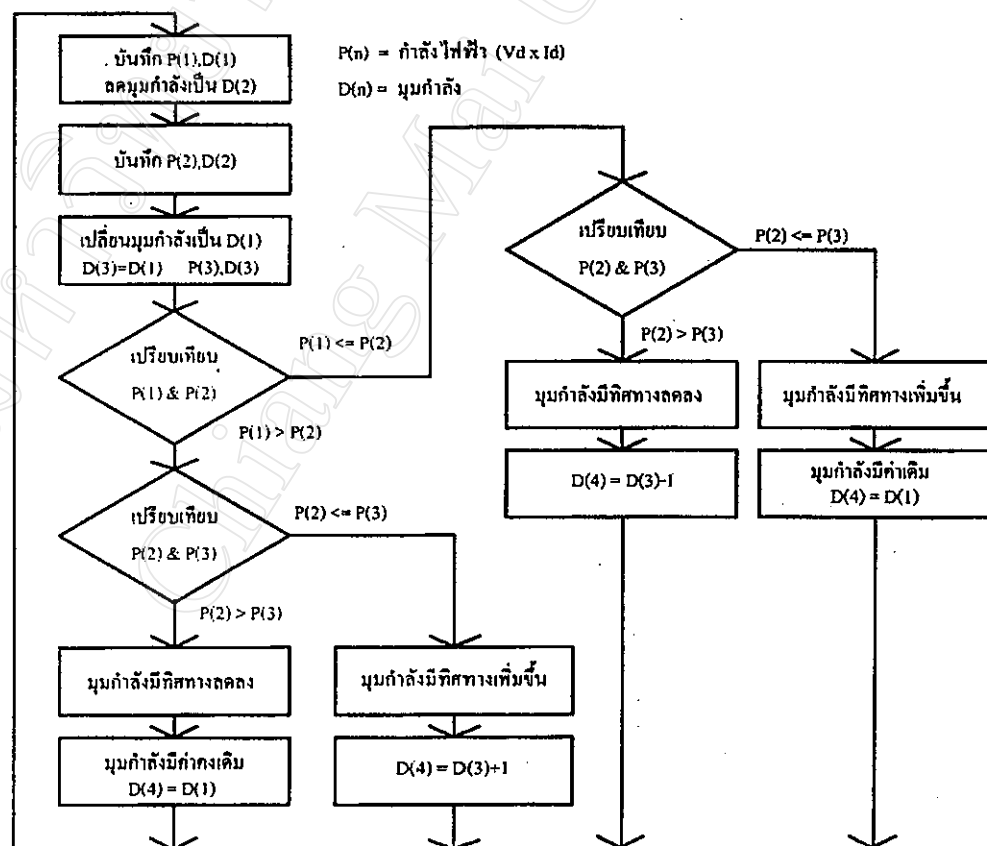
รูปที่ 4.16 แผนภาพกรอบโปรแกรมส่งข้อมูลเพื่อควบคุมชิปพีดับเบิลยูเอ็ม

4.3.4 โปรแกรมแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล

ไมโครคอนโทรลเลอร์มีช่องแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล 4 ช่อง ผลลัพธ์ที่ได้เป็นข้อมูลขนาด 10 บิต การแปลงสัญญาณแอนะล็อกใช้แอสแตรัส 0002H เป็นแอสแตรัสควบคุม และอ่านข้อมูลจากแอสแตรัส 0002H และ 0003H รวมกันเป็น 10 บิต สัญญาณแอนะล็อก 0 ถึง 5 โวลต์ จะได้ค่าข้อมูลระหว่าง 0 ถึง 1023 ซึ่งเป็นอัตราส่วนกัน

4.3.5 โปรแกรมควบคุมกำลังไฟฟ้าสูงสุด

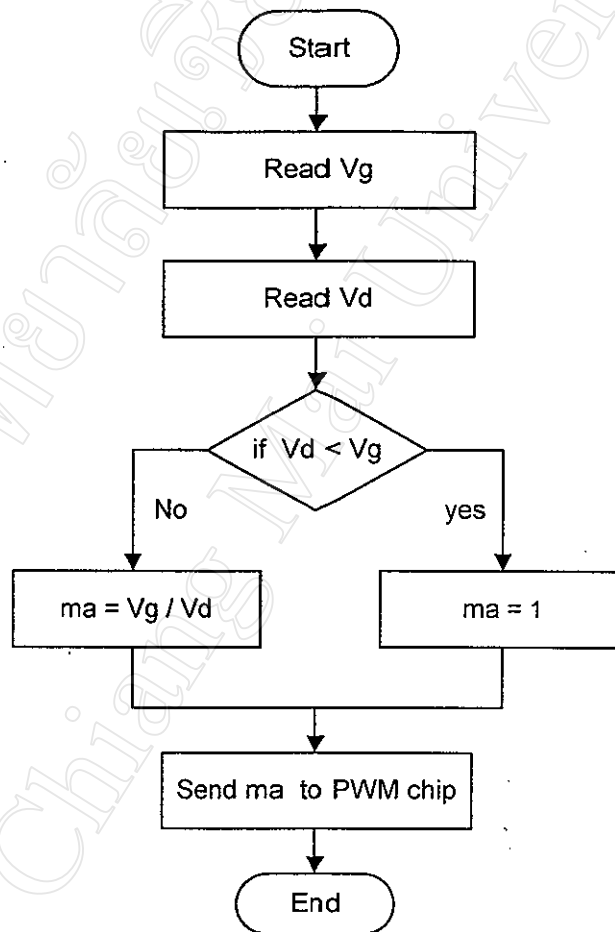
สมมุติว่าแรงดันแรงดันกริดและแรงดันอินเวอร์เตอร์มีค่าคงที่ มุมกำลังจะเป็นตัวแปรที่ควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ การจ่ายกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นผลให้จุดทำงานแผงเซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนแปลงไป จึงต้องโปรแกรมปรับค่ามุมกำลังเป็นระยะ ๆ จนสามารถทราบทิศทางการเพิ่มหรือลดกำลังไฟฟ้า จนได้จุดที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด ไมโครคอนโทรลเลอร์จะอ่านค่าแรงดันและกระแสทุก ๆ หนึ่งวินาที ดังนั้นการควบคุมกำลังไฟฟ้าสูงสุดจึงมีรอบการคำนวณทุก ๆ 3 วินาที แสดงเป็นแผนผังโปรแกรม ดังรูปที่ 4.17 การควบคุมกำลังไฟฟ้าสูงสุดนี้จะใช้เมื่อมุมกำลังมีค่าสูงกว่า 4 องศา หรือกำลังไฟฟ้าจ่ายออกไปสูงกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดกำลัง เนื่องจากมุมกำลังระหว่าง 0-4 องศาจะมีการโปรแกรมปรับความถี่แรงดันเอาต์พุตเพื่อทดสอบสภาวะ Islanding ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ได้เปลี่ยนแปลงจึงไม่จำเป็นต้องใช้โปรแกรมควบคุมกำลังไฟฟ้าสูงสุดนี้



รูปที่ 4.17 แผนผังโปรแกรมควบคุมกำลังไฟฟ้าสูงสุด

4.3.6 โปรแกรมควบคุมตัวประกอบกำลัง

อินเวอร์เตอร์จะต้องควบคุมตัวประกอบกำลังให้มีค่าสูงสุด เพื่อจ่ายกำลังแอกทีฟมากที่สุด และจ่ายกำลังรีแอกทีฟน้อยที่สุดให้แก่กริดระบบไฟฟ้า การควบคุมตัวประกอบกำลังนี้ทำได้โดยปรับแรงดันอินเวอร์เตอร์ให้เท่ากับและแรงดันกริดระบบไฟฟ้า แรงดันกริดระบบไฟฟ้าและแรงดันกระแสตรงจะเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะประมวลผลค่าดัชนีมอดูเลตให้แก่ชิปพีดีบีแอลยูเอ็มเพื่อให้แรงดันอินเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับแรงดันกริดระบบไฟฟ้าอยู่เสมอ โปรแกรมควบคุมตัวประกอบกำลังจะประมวลผลทุกๆ 1 วินาทีแผนผังการทำงานแสดงในรูป 4.18

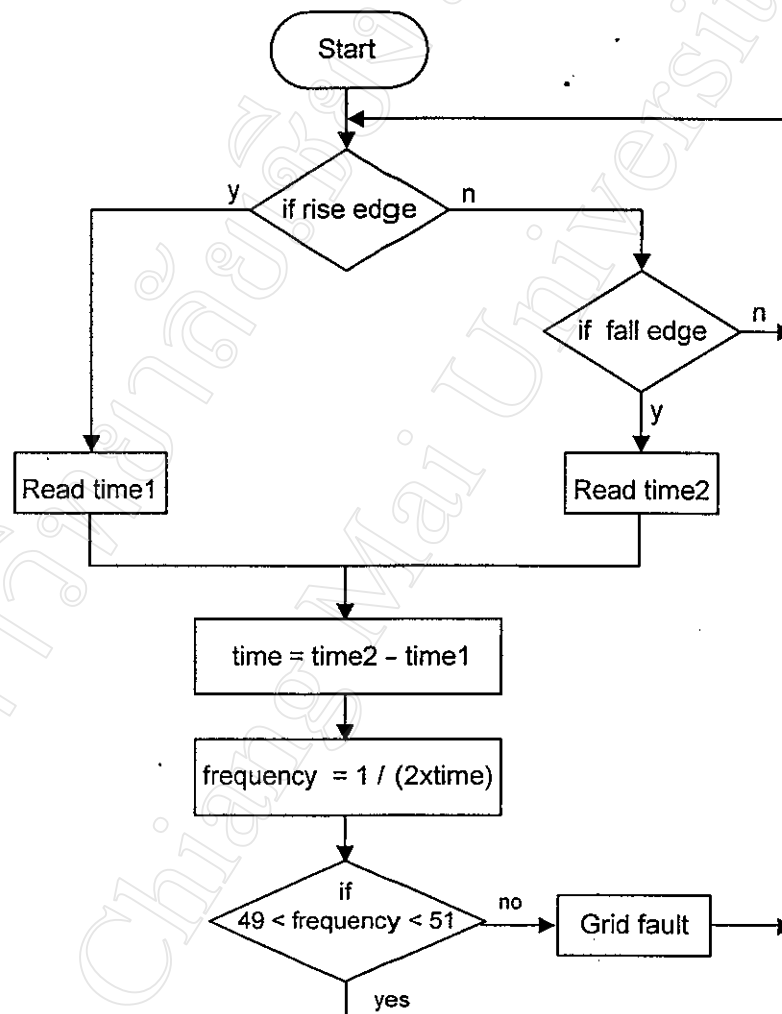


รูปที่ 4.18 แผนผังโปรแกรมควบคุมตัวประกอบกำลัง

4.3.7 โปรแกรมตรวจสอบการเลื่อนเฟสกลับ

เมื่ออินเวอร์เตอร์ต่อกับกริดระบบไฟฟ้าและจ่ายกำลังไฟฟ้า จะมีการตรวจสอบสถานะ Islanding เพื่อจะได้ทราบว่ากริดระบบไฟฟ้าผิดปกติหรือไม่ ในกรณีที่อินเวอร์เตอร์จ่ายกำลังไฟฟ้านั้นแรงดันอินเวอร์เตอร์จะมีมูมกำลังนำหน้าแรงดันกริดระบบไฟฟ้าเสมอ ถ้ากริดระบบ

ไฟฟ้าไม่มีแรงดันไฟฟ้าหรือผิดปกติ แรงดันอินเวอร์เตอร์จะเลื่อนเฟสทันที ทำให้มีความกว้างในหนึ่งคาบลดลง กรณีนี้การตรวจวัดความถี่แรงดันกริดระบบไฟฟ้าจะตรวจพบความถี่เพิ่มขึ้น แสดงว่าการต่อกับกริดระบบไฟฟ้าผิดปกติ วิธีนี้เป็นการตรวจสอบแบบพาสซีฟ (Passive method) กำหนดค่าความถี่สูงกว่า 51 เฮิรตซ์ หรือต่ำกว่า 49 เฮิรตซ์ถือว่ากริดระบบไฟฟ้าผิดปกติ แสดงแผนผังโปรแกรมตรวจสอบเลื่อนเฟสกลับคืนในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 แผนผังโปรแกรมตรวจสอบเลื่อนเฟสกลับคืน

4.3.8 โปรแกรมทดสอบปรับความถี่แรงดันอินเวอร์เตอร์

เมื่ออินเวอร์เตอร์ต่อกับกริดระบบไฟฟ้าโดยจ่ายกำลังไฟฟ้าต่ำหรือมุ่มกำลังน้อยกว่า 4 อกศา ถ้ากริดระบบไฟฟ้าผิดปกติ การตรวจสอบสภาวะ Islanding ด้วยวิธีเลื่อนเฟสกลับคืนอาจจะไม่สามารถพบได้ทันทีเนื่องจากเกิดการเลื่อนเฟสเพียงเล็กน้อย ดังนั้นต้องมีวิธีตรวจสอบแบบแยกที่ฟ

(Active method) เพิ่มขึ้น การปรับความถี่แรงดันอินเวอร์เตอร์ให้แตกต่างจากแรงดันกริดระบบไฟฟ้า ผลที่เกิดขึ้นถ้าความถี่แรงดันที่วัดได้จากขั้วแรงดันกริดระบบไฟฟ้า มีค่าเท่ากับความถี่ที่ปรับไว้แสดงว่าแรงดันกริดระบบไฟฟ้าไม่มีหรือเกิดผิดร่อนนั่นเอง การปรับความถี่จะทดสอบเป็นระยะเวลา 7 ไซเคิลทุก ๆ 1 วินาที โดยปรับความถี่ให้สูงขึ้นประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์หรือ 51 เฮิร์ตซ์ เมื่ออินเวอร์เตอร์มีมูมกำลังมากกว่า 4 องศาแล้ว วิธีการปรับความถี่เอาต์พุตก็ไม่มี ความจำเป็นอีกต่อไปเพราะวิธีตรวจสอบการเลื่อนเฟสจับพลันสามารถตรวจพบได้ทันที

4.3.9 ข้อกำหนดการตรวจสอบแรงดันเพื่อต่อกับกริดระบบไฟฟ้า

การต่ออินเวอร์เตอร์กับกริดระบบไฟฟ้า จะต้องตรวจสอบความพร้อมของแรงดันกระแสตรงจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และแรงดันกริดระบบไฟฟ้าก่อน ได้กำหนดเงื่อนไขดังต่อไปนี้

ด้านแรงดันกระแสตรง แรงดันอินพุตจะต้องไม่เกิน 136 โวลต์ โดยมีแรงดันไม่ต่ำกว่า 85 โวลต์ เป็นเวลาไม่ต่ำกว่า 10 นาที หรือมีแรงดันระหว่าง 100-136 โวลต์ เป็นเวลาไม่ต่ำกว่า 10 วินาที

ด้านแรงดันกริดระบบไฟฟ้า จะต้องมีความถี่ระหว่าง 210 - 240 เฮิร์ตซ์ ที่ความถี่ 49-51 เฮิร์ตซ์ เป็นเวลาไม่ต่ำกว่า 10 วินาที

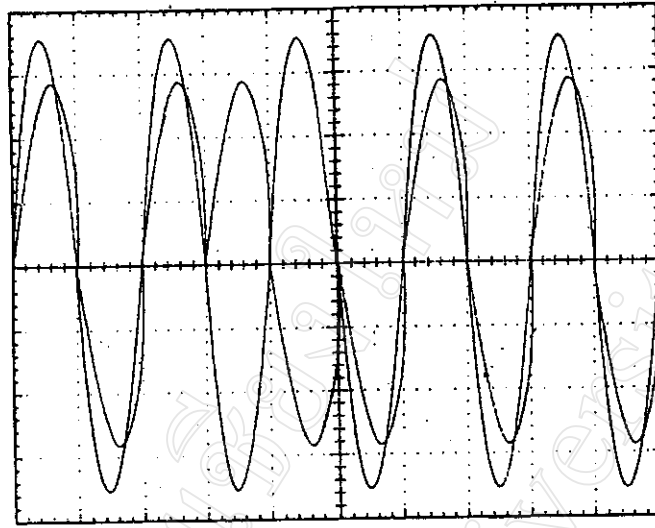
4.3.10 ข้อกำหนดการหยุดต่อกับกริดระบบไฟฟ้า

การหยุดต่อกับกริดระบบไฟฟ้าจะสั่งชิปพีดีบียูเอ็มหยุดกำหนดสัญญาณพีดีบียูเอ็มโดยควบคุมที่แอสแตรอส 0002H กำหนดให้บิตที่หนึ่งเป็นลอจิกศูนย์ หลังจากนั้นสั่งชิป 8255 ตัวที่สองควบคุมให้โซลิดสเตตรีเลย์เปิดวงจร การหยุดต่อกับกริดระบบไฟฟ้ามีหลายเงื่อนไขคือ สั่งจากคีย์สวิตช์ แรงดันกระแสตรงต่ำกว่าหรือสูงกว่าพิกัด แรงดันกริดระบบไฟฟ้าต่ำกว่าหรือสูงกว่าพิกัด ความถี่แรงดันกริดระบบไฟฟ้าต่ำกว่าหรือสูงกว่าพิกัด หรือตรวจพบสภาวะ Islanding

4.4 ปัญหาสัญญาณรบกวนระบบควบคุม

การชิงโครโนซ์กับกริดระบบไฟฟ้าเป็นหน้าที่สำคัญที่สุด โดยครั้งแรกใช้ External interrupt ของไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นตัวรับสัญญาณชิงโครโนซ์จากวงจรตรวจวัดจุดตัดศูนย์ของแรงดันกริดระบบไฟฟ้า หลังจากนั้นจึงสั่งให้ชิปพีดีบียูเอ็มกำเนิดสัญญาณพีดีบียูเอ็มสร้างแรงดันอินเวอร์เตอร์ขึ้นมาให้มีมูมเฟสสัมพันธ์กับแรงดันกริดระบบไฟฟ้าทุก ๆ ไซเคิล

การทดสอบใช้งานพบว่าไมโครคอนโทรลเลอร์ มีความไวต่อสัญญาณรบกวนทำให้ระบบควบคุมการทำงานผิดพลาด เช่น กำเนิดสัญญาณเกิดขึ้นมาผิดพลาด ทำให้สร้างแรงดันอินเวอร์เตอร์ขึ้นมาไม่สัมพันธ์กับแรงดันกริดระบบไฟฟ้าเป็นสาเหตุให้วงจรกำลังเสียหายแสดงในรูปที่ 4.20 เป็นตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอินเวอร์เตอร์ที่ผิดพลาดเทียบกับแรงดันกริดระบบไฟฟ้า



รูปที่ 4.20 รูปคลื่นแรงดันอินเวอร์เตอร์สร้างขึ้นมาผิดพลาด

จากรูปที่ 4.20 แรงดันอินเวอร์เตอร์มีขนาดต่ำกว่าแรงดันกริดระบบไฟฟ้า ถูกสร้างขึ้นมาไม่สัมพันธ์กับมุมเฟสแรงดันกริดระบบไฟฟ้า และมักจะเกิดผิดพลาดโดยเริ่มที่จุดตัดศูนย์ของแรงดันกริดระบบไฟฟ้าเป็นส่วนมาก บางครั้งสัญญาณรบกวนจะเกิดขึ้นเมื่อมีการสวิตช์ไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าบริเวณข้างเคียง แรงดันอินเวอร์เตอร์ที่สร้างขึ้นมาผิดพลาดนี้จะทำให้กระแสไหลวงจรอินเวอร์เตอร์สูงเป็นสาเหตุให้อิซีบีที โซลิดสเตตรีเลย์ และฟิวส์เสียหายได้พยายามแก้ปัญหาสัญญาณรบกวนดังกล่าวหลาย ๆ วิธีดังต่อไปนี้

- 1) ใช้อุปกรณ์ลดสัญญาณรบกวนวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Low Noise Filter) กับระบบควบคุม
- 2) ใช้อุปกรณ์ลดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI Filter) ต่อกับกริดระบบไฟฟ้า
- 3) ใช้แหล่งจ่ายกระแสตรง สำหรับระบบควบคุมหลาย ๆ แบบ เช่น วงจรสวิตซ์ซิงเบตเตอร์
- 4) ปรับแต่งลายวงจรไฟฟ้าระบบควบคุม
- 5) ติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดไว้ในตู้เหล็ก
- 6) ปรับปรุงวงจรตรวจวัดจุดตัดศูนย์ของแรงดันกริดระบบไฟฟ้า
- 7) ปรับปรุงซอฟต์แวร์

วิธีการต่าง ๆ ที่กล่าวมาลดสัญญาณรบกวนได้เป็นบางส่วน หรือบางครั้งการรบกวนเป็นไปแบบสุ่ม จึงยังไม่สามารถแก้ไขปัญหาสัญญาณรบกวนได้ จนในที่สุดสังเกตได้ว่าสัญญาณ

รบกวนที่เกิดขึ้นนั้นจะเกิดขึ้นเมื่อใช้ฟังก์ชัน External interrupt ของไมโครคอนโทรลเลอร์เท่านั้น จึงได้หลีกเลี่ยงการใช้ External interrupt ในการซิงโครไนซ์กับกริดระบบไฟฟ้าและหาวิธีการอื่น ๆ แทน จึงใช้พอร์ตอินพุตความเร็วสูง (High speed input) ซึ่งมีความเร็วในการตรวจจับสูงดังที่ได้กล่าวในหัวข้อ 4.3.2 จากการโปรแกรมและทดสอบวิธีสแกนหาขอบขาขึ้นและขอบขาลงของ สัญญาณซิงโครไนซ์ด้วยพอร์ตอินพุตความเร็วสูง พบว่าไมโครคอนโทรลเลอร์ถูกรบกวนน้อยกว่า เดิมมาก แต่เมื่อกระแสในวงจรอินเวอร์เตอร์สูงขึ้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะถูกสัญญาณรบกวนอีก จนไม่สามารถทำงานต่อไปได้ ดังนั้นปัญหาระบบนี้คาดว่าเกิดจากการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference : EMI) ซึ่งเป็นผลมาจากการสวิตช์ของไอจีบีที และแรงดันชั่วครู่ที่ ขั้วอินเวอร์เตอร์ที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ 3.5 ได้แก้ไขปัญหานี้โดยปรับปรุงวงจร snubber สำหรับ ไอจีบีที (RC snubber) จนสามารถแก้ไขปัญหาระบบสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ได้ทั้งหมด

ปัญหาระบบสัญญาณรบกวนที่เกิดและไอจีบีทีเสียหายนี้ อาจจะสรุปได้ว่าเกิดจากหลาย ๆ สาเหตุรวมกันซึ่งเกี่ยวข้องกัน เช่น แรงดันชั่วครู่ที่สูงมากที่ขั้วแรงดันอินเวอร์เตอร์หรือที่ดักคร่อม ไอจีบีที เป็นสาเหตุที่ส่งสัญญาณรบกวนให้แก่ระบบควบคุม ถ้าหาสาเหตุนี้ไม่พบการแก้ไขสัญญาณรบกวนที่ระบบควบคุมอย่างเดียวก็ไม่อาจแก้ไขได้ และในขณะที่ระบบควบคุมใช้ฟังก์ชัน External interrupt อยู่ก็ไม่สามารถแก้ไขปัญหาก็ได้เช่นกัน รวมทั้งการติดตั้งตำแหน่ง ตัวเหนี่ยวนำ L_g ไว้ทางด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลงกำลัง ก็เป็นสาเหตุให้วงจรตรวจวัดจุดตัดศูนย์ เกิดผิดพลาดขึ้นซึ่งผลที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกับระบบควบคุมถูกสัญญาณรบกวน ทำให้การวิเคราะห์หาสาเหตุของที่มาของสัญญาณรบกวน สาเหตุที่ไอจีบีทีเสียหาย และการออกแบบขนาด ตัวเหนี่ยวนำ L_g ที่เหมาะสม เป็นไปด้วยความสับสน