สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุด

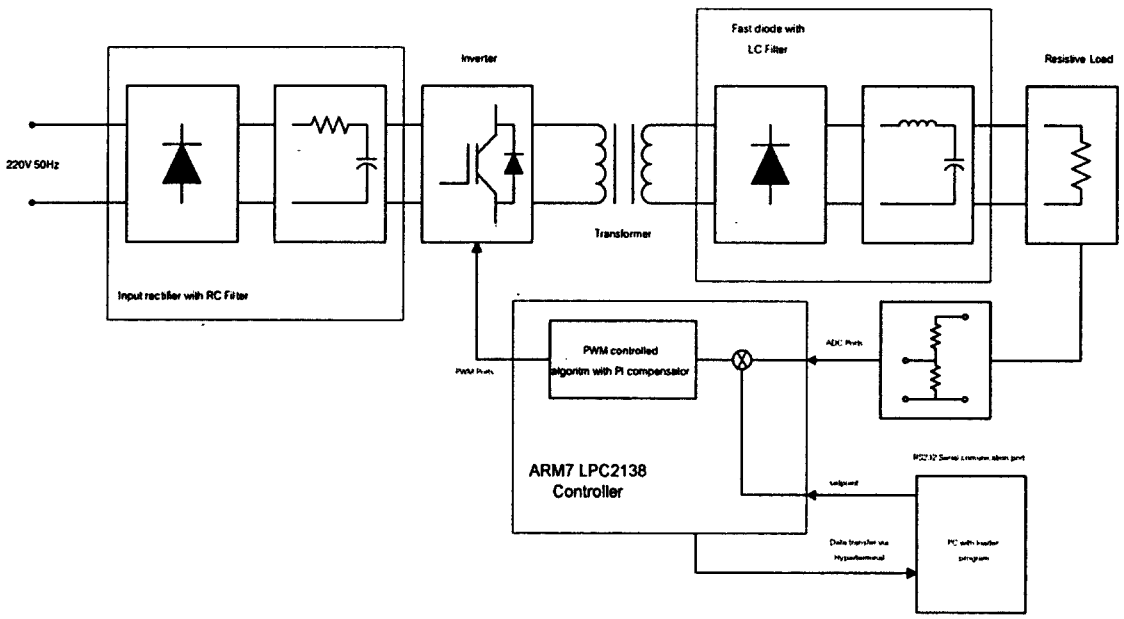
บทที่ 3

การออกแบบแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง

3.1 โครงสร้างหลักของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง

การออกแบบระบบจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบ แหล่งจ่ายไฟสวิตชิ่งแบบฟลูบริดจ์ ขนาด 500 วัตต์ 48 โวลท์ ที่ใช้ระดับแรงดันอินพุทขนาด 220 โวลท์ ±5 เปอร์เซ็นต์ โดยทั้งนี้ การควบคุมระบบจะใช้ ไมโครคอนโทรเลอร์ ARM7 LPC2138 ของบริษัท Phillips เป็นตัวประมวลผลการควบคุม

หลักการออกแบบ แหล่งจ่ายไฟสวิตชิ่ง นี้จะสามารถแบ่งแยกออกเป็นทั้งหมด 6 ส่วนหลักๆ ซึ่งประกอบกันเข้าเป็น แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบทางวิศวกรรม การเลือกใช้งานอุปกรณ์ต่าง สาเหตุในการเลือกใช้งาน จะอธิบายตามลำดับต่อไปนี้



ภาพประกอบที่ 3-1 โครงสร้างหลักแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง

1. แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่ใช้อินพุท เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 220 โวลท์ พร้อมอุปกรณ์ปกป้องต่างๆ

2. อินเวอร์เตอร์ใช้งานโดยการสวิตช์ที่ระดับความถี่ขนาด 115 กิโลเฮิรตซ์ แบบฟลูบริดจ์ สัญญาณสี่เหลี่ยม

3. หม้อแปลงความถี่สูงใช้แกนเฟอร์ไรต์ เป็นตัวส่งผ่านกำลังไฟฟ้า ทั้งนี้หม้อแปลง แบบนี้จะเหมาะสมกับการสวิตช์ที่ความถี่สูง

4. วงจรเรียงกระแสเอาท์พุทที่ประกอบด้วย Fast Recovery Diode ที่ทำงานที่ระดับความถี่ 230 กิโลเฮิรตซ์

5. วงจรกรองเอาท์พุทแบบ RLC ใช้งานในการกรองแรงดันเอาท์พุทให้เหลือแค่แรงดันกระแสตรง

6. ตัวควบคุมและประเมินผล เป็น การควบคุมแบบป้อนกลับประมวลสัญญาณเชิงดิจิตอล ที่ใช้ตัวประมวลสัญญาณARM7 LPC2138 เป็นตัวควบคุมระบบ

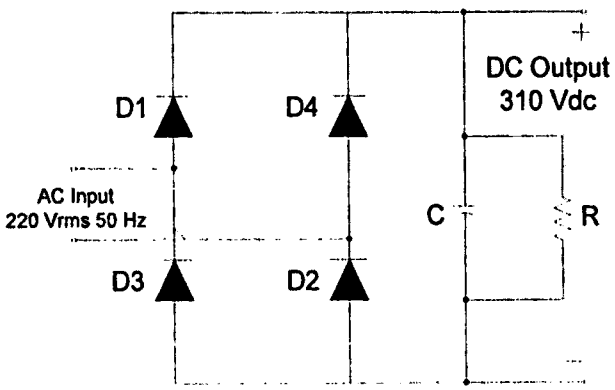
3.2 ลำดับและขั้นตอนการออกแบบ

ขั้นตอนในการออกแบบอย่างที่กล่าวข้างต้นนี้นั้น จะสามารถแยกการคำนวณออกมาเป็นชุดหลักๆได้ดังนี้

1. การออกแบบวงจรเรียงกระแสด้านเข้า
2. การออกแบบระบบขับสัญญาณมอสเฟส
3. การเลือกใช้งานมอสเฟส และ ชุดขับสัญญาณที่เหมาะสม
4. การออกแบบ หม้อแปลงความถี่สูง
5. การออกแบบวงจรเรียงกระแสเอาท์พุท
6. การออกแบบวงจรกรอง RLC
7. การควบคุมระบบโดยตัวประมวลผล

3.3 การออกแบบวงจรเรียงกระแสด้านเข้า

การออกแบบแหล่งจ่ายหลักให้กับชุดอินเวอร์เตอร์นั้นมีความสำคัญมากกับแหล่งจ่ายไฟสวิตชิ่ง เนื่องจาก ถ้าการออกแบบที่ไม่เหมาะสมนั้นจะทำให้ แหล่งจ่ายไฟสวิตชิ่ง ทำงานผิดพลาดทั้งระบบ รวมถึงการเลือกใช้อุปกรณ์ที่เหมาะเช่นกัน อย่างเช่น ตัวเก็บประจุที่ใช้งานต้องมีค่ามากพอหรือมีค่า ESR ที่น้อยขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของ แต่ละระบบ อย่างที่กล่าวข้างต้น



ภาพประกอบที่ 3-2 วงจรเรียงกระแสด้านอินพุทของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง

กำหนดให้แรงดันอินพุท เท่ากับ 220 โวลท์ ± 10 เปอร์เซ็นต์ 50 เฮิรตซ์ เอาท์พุทสูงสุดที่กำหนดไว้คือขนาด 500 วัตต์ ให้ประสิทธิภาพของระบบเป็นขนาด 80 เปอร์เซ็นต์ เราจะสามารถหากำลังไฟฟ้าอินพุทได้ดังสมการ(3.1)

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta} \qquad (3.1)$$

$$= \frac{500}{0.8}$$

$$= 625 \quad \text{วัตต์}$$

จากแรงดันที่ไฟฟ้ากระแสสลับไหลเข้า 220 โวลท์ นั้นจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ปลายทางที่มีขนาด 310 โวลท์ กระแสไฟกระแสตรงเฉลี่ยจะได้ดังสมการ(3.2)

$$I_{dc} = \frac{P_{in}}{V_{in}} \qquad (3.2)$$

$$= \frac{625}{310}$$

$$= 2.01 \quad \text{แอมป์}$$

จากการคำนวนข้างต้นนั้นเราสามารถที่จะคำนวนหาค่าตัวเก็บประจุที่ใช้กรองแรงดันเอาท์พุทให้เรียบได้จากสมการด้านล่าง เมื่อกำหนดให้ริปเปิลมีขนาด 10 เปอร์เซ็นต์ หรือเปรียบเทียบจะได้แรงดันขนาด 310 โวลท์ ที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์ แบบฟลูบริดจ์จะมีคาบเวลาเท่ากับ 10 มิลลิวินาที

$$C_t = \frac{I_{dc}\Delta t}{\Delta V_{r(P-P)}} \qquad (3.3)$$

$$= \frac{I_{dc} \cdot T/2}{0.1 \cdot V_{in}}$$

$$= \frac{2.01 \cdot 20 \cdot 10^{-3}/2}{0.1 \cdot 310}$$

$$= 6.484 \cdot 10^{-4} \qquad F$$

หรือ

$$= 648.4 \qquad \mu F$$

ผลของการเลือกค่าตัวเก็บประจุที่ได้จากการคำนวนจะทำให้เราทราบถึงขนาดของตัวเก็บประจุที่แท้จริง แต่การเลือกตัวเก็บประจุนั้นจะต้องเน้นที่ตัวเก็บประจุที่มีขนาดมากกว่าที่เราคำนวณได้ ในกรณีนี้ ตัวเก็บประจุที่เราคำนวณได้ มีค่าเท่ากับ 648.4 μF ทั้งนี้เราเลือกที่จะใช้งานที่ 750 μF ที่แรงดันขนาด 450โวลท์ และไดโอดที่ใช้งานต้องทนกระแสได้มากกว่า 1.5 เท่าของกระแส กระแสตรงนั่นก็หมายความว่า ควรเลือกไดโอดที่มีความทนกระแสได้เท่ากับ 3 แอมป์ และแรงดันต้องมีขนาดมากกว่า 450 โวลท์

การทำงานเริ่มแรกของการเปิดไฟไหลเข้าระบบนั้นจะเกิดปัญหาหลักคือ เมื่อเริ่มต้นทำงานโดยการสับสวิตท์เข้านั้น ตัวเก็บประจุในสถานะเริ่มต้นจะมีการลัดวงจร ในขณะเปิด เพราะฉะนั้นถ้าต้องการลดกระแสกระชากนี้นั้น จึงต้องมีการแก้ปัญหานี้โดยการนำเอาค่าความต้านทานไปอนุกรมกับสายนำกระแสซึ่งเมื่อเราเริ่มสับสวิตท์นั้น แทนที่กระแสจะมีค่าสูงเนื่องมีตัวเก็บประจุตัวเดียว กระแสจะไหลผ่านตัวต้านทานนั้น หลังจากกระแสไหลเข้าจนแรงดันคงที่ เราจะทำการสับสวิตท์ไปที่ตำแหน่งที่ปราศจากตัวต้านทาน ทั้งนี้เพื่อลดค่าการสูญเสียในระบบให้เหลือน้อยที่สุด เนื่องจาก ตัวต้านจะทำให้เกิดความร้อนที่สะสมเนื่องจาก I^2R

ส่วนสุดท้ายที่ต้องคำนึงถึงคือ การออกแบบตัวต้านทานท้าย(Dummy load) ตัวต้านทานนี้มีหน้าที่ในการรับการคายประจุจาก ตัวเก็บประจุ เมื่อกรณีที่ ปิดวงจรโดยฉับพลัน ความหมายคือ ถ้าไม่มี ตัวต้านทานตัวนี้ แรงดันที่ ตัวเก็บประจุจะยังคงมีแรงดันที่ตกคร่อมอยู่ ตัวต้านทานตัวนี้มีค่ากำลังสูงมากยิ่งดีเนื่องจะยังคงรับโหลดตลอดเวลา จากสมการด้านล่างจะเป็นตัวกำหนดขนาด และกำลังที่ตัวต้านทานต้องรับ ถ้าเลือกค่าความต้านทานขนาด 15 กิโลโอห์ม

$$P = \frac{V^2}{R} \qquad (3.4)$$

$$= \frac{310^2}{15 \cdot 10^3}$$

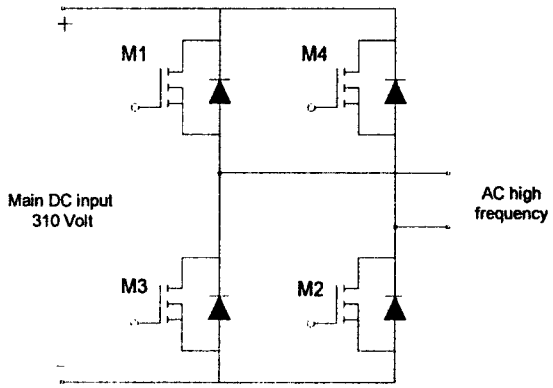
$$= 6.41 \qquad \text{วัตต์}$$

ดังนั้นเราควรเลือก ค่าความต้านทานนี้ที่ค่า 15 กิโลโอห์ม 10 วัตต์ หรือ มากกว่า

3.4 อินเวอร์เตอร์

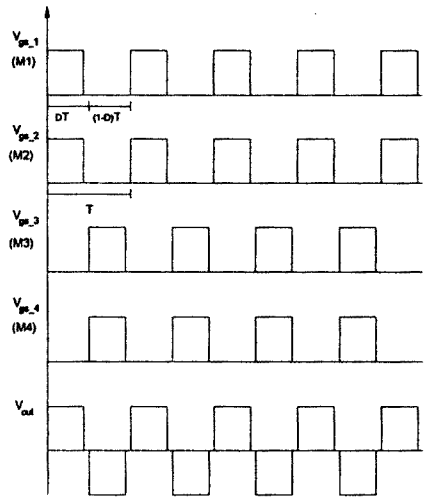
พื้นฐานของการแปลงระบบไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกระแสสลับนั้นเราจะทำการแปลงโดยให้ อินเวอร์เตอร์ การออกแบบอินเวอร์เตอร์นั้นหลักๆ อยู่ที่ขนาดของกำลัง(วัตต์) ที่เราใช้งาน รูปแบบการสวิตท์ THD และอีกหลายๆอย่างที่จะกล่าวต่อไป

การออกแบบอินเวอร์เตอร์ ที่ใช้งานในที่นี้นั้นใช้ความถี่ในการสวิตท์ ที่ 115 กิโลเฮิรตซ์ เป็น
ฟลูบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ซึ่งการออกแบบนี้นั้นเหมาะสมกับขนาดของแรงดันสูง กำลังตั้งแต่ 400-2000 วัตต์ขึ้นไป จากรูป ด้านล่างแสดงให้เห็นการจัดเรียงของมอสเฟส จำนวน 4 ตัว



ภาพประกอบที่ 3-3 วงจรอินเวอร์เตอร์

ถ้าสังเกตถึงการจัดรูปแบบของตัวสวิตชิ่ง ต่างๆนั้นจะเห็นว่า M1 และ M2 จะทำงานพร้อมกันที่ความถี่ 115 กิโลเฮิรตซ์ แต่ละจะมีค่า Duty Cycle ไม่เกินตัวละ 0.5 หรืออีกความหมายก็คือต้องมีค่าน้อยกว่า 0.5 นั่นเอง ในทำนองเดียวกันนี้ M3 และ M4 ก็จะมีค่าได้ไม่เกิน 0.5 เช่นกัน หลักการของการทำงานของสวิตท์ทั้ง 4 ตัวนี้จะเป็นไปตามภาพประกอบด้านล่าง



ภาพประกอบที่ 3-4 รูปสัญญาณของชุดขับกับแรงดันด้านเอาท์พุท

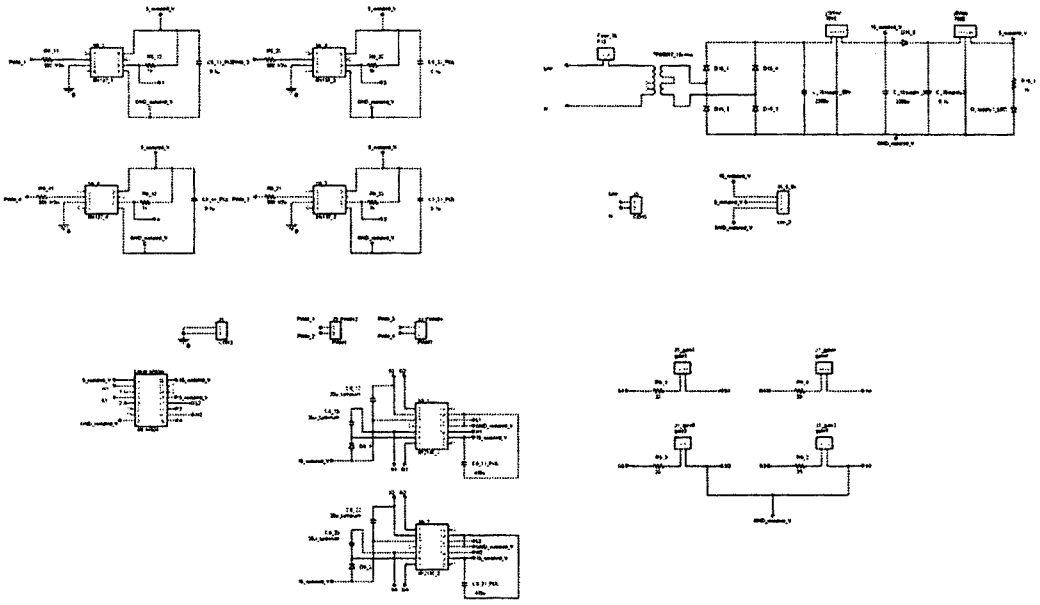
สาเหตุหลักของการจำกัดขอบเขตของ Duty Cycle ของแต่ละชุดก็คือ ถ้าสังเกตจากรูปแล้วนั้น M1 และ M3 ทำงานพร้อมกันไม่ได้ ในทำนองเดียวกัน M4 และ M2 ก็ไม่สามารถที่จะทำงานพร้อมกันได้เนื่องจาก หากคู่ใดคู่หนึ่งเกิดทำงานพร้อมกันขึ้นมา จะเกิด การลัดวงจรขึ้นทันที การลัดวงจรนี้นั้นจะ เกิดขึ้นและแรงที่สุด เนื่องแรงดันที่ตกคร่อม สวิตท์ ทั้งสองตัวในคู่ของมันมีค่าสูงถึง 310 โวลท์และเป็นแรงดันกระแวตรง แต่ Ron ใน ขณะที่มอสเฟส ทำงานมีค่าเพียง 0.33 โอห์มต่อตัว ดังนั้นกระแสจะมีค่าสูงมาก

จากหลักการทำงานเบื้องต้นของอินเวอร์เตอรีแบบฟลูบริดจ์นั้นเป็นพื้นฐานในการแปลงกระแสตรงเป็นกระแสสลับ การเลือก มอสเฟส พร้อมทั้งชุดขับจึงเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างมากในการออกแบบระบบโดยรวม

มอสเฟสที่มีขายอยู่ในท้องตลาดจะมีหลายรูปแบบ มีทั้งแบบเดี่ยว อย่างเช่นมอสเฟสตระกูล IR ซึ่งเป็นที่นิยม แพร่หลายกับการใช้งานในระดับการทดลองเนื่องจากมีราคาค่อนข้างจะประหยัด การที่เราจะเลือกใช้งาน มอสเฟส ตัวใดนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย โดยหลักๆแล้วนั้น แรงดัน และกระแส จะเป็น ตัวเลือกแรกของการกำหนดอุปกรณ์นั้นๆ

จากการคำนวณกระแสที่ไหลผ่านตัวมอสเฟส นี้ตามสมการด้านล่าง เนื่องจากแรงดันที่เราใช้งานอยู่ที่ 310 โวลท์ ขนาดของเอาพุท เท่ากับ 500 วัตต์ กระแสสูงสุดที่ไหลผ่านมอสเฟสตัวนี้จะมีค่าเท่ากับ 1.61 แอมป์ ในที่นี้ได้เลือก IRFP460 ซึ่งตาม Datasheet แล้วนั้นทนกระแสได้ถึง 16 แอมป์ แรงดันที่สามารถใช้งานได้จะอยู่ระดับ 600 โวลท์

การใช้งานมอสเฟส นั้นต้องทำการต่อชุดขับให้เหมาะสมกับการใช้งาน ในภาพด้านล่างเป็น Schematic ของชุดขับที่ถูกออกแบบมาเพื่อขับมอสเฟส 4 ตัว ซึ่งหลักๆแล้วจะมีการอธิบายในอุปกรณ์แต่ละตัวในหัวข้อต่อไป



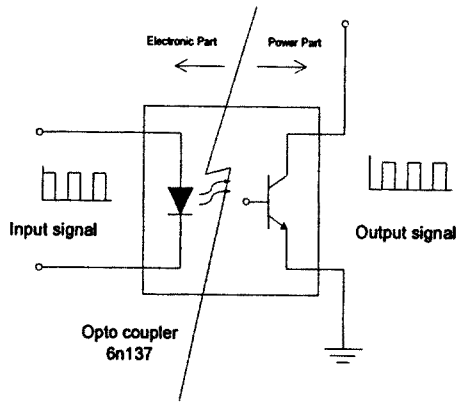
ภาพประกอบที่ 3-5 วงจรชุดขับมอสเฟส

ชุดขับมอสเฟส สามารถแบ่งออกเป็นทั้งหมด 4 ส่วน

1. ตัวแยกทางไฟฟ้า: การแยกกันทางไฟฟ้าระหว่างด้านกำลังและทางด้านอิเล็กทรอนิกส์
2. ตัวยกระดับแรงดัน: ส่วนของการปรับระดับแรงดันให้เข้าสูระดับที่เราต้องการ
3. ชุดขับมอสเฟส: ส่วนนี้จะมีหน้าที่ตรงในการขับมอสเฟสซึ่งจะมีสัญญาณขับชุดล่างและบน
4. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง: ทำหน้าที่จ่ายแรงดันไปเลี้ยงส่วนต่างๆของวงจร ไอซี

3.4.1 การแยกทางไฟฟ้า

การแยกกันทางไฟฟ้า มีความจำเป็นมากสำหรับแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง เนื่องจากการแยกกันทางไฟฟ้าดังกล่าวป้องกันการลัดวงจรหาซึ่งกันและกัน หรือเรียกง่ายๆว่าเป็นระบบป้องกันอย่างหนึ่ง ในชุดที่ทำการทดลองนี้นั้น เราเลือกที่จะใช้ Opto Coupler เป็นตัวแยกทางไฟฟ้า การทำงานของ Opto Coupler นั้นจะทำงานด้วยแสง กล่าวคือถ้ามีสัญญาณทางด้านอินพุท แล้วนั้นจะเกิดแสงไปปิดวงจรอีกฝั่ง ดังนั้นวงจรอีกฝั่งจึงต้องมี แรงดัน หรือไฟเลี้ยงเสมอ อธิบายได้ดังรูปด้านล่าง



ภาพประกอบที่ 3-6 ตัวแยกทางไฟฟ้า

สัญญาณที่ได้รับนั้นจะมีลักษณะสัญญาณตรงกันข้าม เพราะฉะนั้นการต่ออินพุท ต้องคำนึงถึงส่วนนี้ด้วย ในกรณีนี้สามารถที่จะใช้ Buffer จำพวก 74HCxxx ต่อก่อนเข้า opto coupler ได้

การเลือกใช้งานในงานนี้นั้น เราเลือกใช้ High speed opto 6n137 ผลิตโดย บริษัท Sharps ถ้าสังเกตจาก Datasheet นั้น Opto Coupler รุ่นนี้นั้นจะทำงานหรือมี Rise time กับ Fall time ที่อยู่ในย่านที่เราสามารถไปใช้งานได้

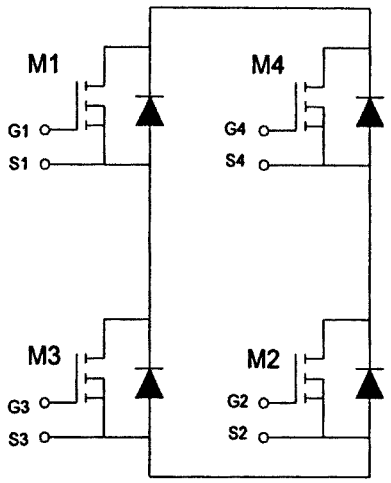
ปัญหาที่มักเจอกับ Opto Couple นี้นั้นจะมีข้อเสียคือ การที่จะคงแรงดันไว้ที่ระดับ 5 โวลท์ เมื่อเปิดเสมอถ้าไม่มีสัญญาณใดในฝั่งอินพุท เพราะฉะนั้นควรระวังเกี่ยวกับการที่มอสเฟส ในกิ่งจะทำงาน พร้อมกัน ทำให้เกิดการลัดวงจร และเสียหายได้

3.4.2 ตัวยกระดับแรงดันไฟฟ้า

เป็นตัวแปลงสัญญาณแรงดันที่ได้รับจาก Opto Couple ซึ่งมีระดับแรงดันเพียง 5 โวลท์ ให้มีค่าเพิ่มขึ้นไปอยู่ในระดับ 15 โวลท์ ใช้สำหรับการปรับแรงดันเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานกับ Driver chip ทั้งนี้การแปลงระดับสามารถปรับได้มากกว่าระดับ 15 โวลท์ ขึ้นอยู่กับ ไฟเลี้ยงที่ป้อนให้แก่ ตัวยกระดับแรงดันไฟฟ้า นี้ ในงานวิจัยนี้เราเลือกที่จะใช้งาน CMOS แบบ MC14504 ของบริษัท Motorolla ซึ่งสามารถใช้งานได้ง่ายไม่ซับซ้อน มีความสามรถที่จะปรับระดับสัญญาณได้ 4 สัญญาณพร้อมกันใน 1 ตัว

3.4.3 ชุดขับมอสเฟส

ในการที่จะทำการขับมอสเฟสนั้น เราจะต้องให้ความสนใจทั้ง ระดับแรงดัน และ กระแสที่เหมาะสมกับมอสเฟส ชนิดนั้นๆ ในที่นี้สัญญาณ พีดับเบิลยูเอ็ม ทั้ง สี่จะถูกต่อกับ IR2110 ซึ่งเป็นที่นิยมแพร่หลายในท้องตลาด การทำงานของ ตัวขับมอสเฟส ตัวนี้นั้นจะทำการต่อโดยตรงกับมอสเฟส ที่เราใช้งาน ตามที่บริษัท IR International กำหนด Datasheet 1 ตัว สามารถที่จะขับมอสเฟสได้สองตัวในรูปแบบของ High กับ Low ความหมายก็คือ ใช้งาน IR2110 2 ตัว

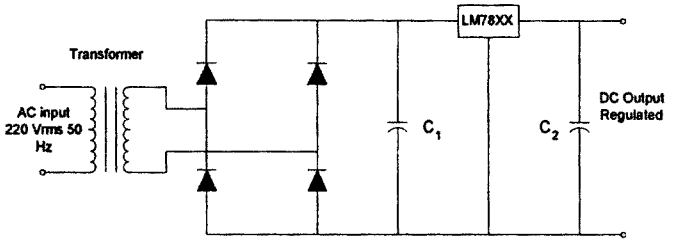


ภาพประกอบที่ 3-7 การต่ออินเวอร์เตอร์แบบฟลูบริดจ์

กล่าวคือ IR2110 ตัวที่ 1 จะต่อ High (G1 S1) เข้ากับเกทของมอสเฟส ตัวที่ 1 สัญญาณ Low (G3 S3)ตัวที่ 1 จะต่อ เข้ากับมอสเฟส ตัวที่ 3ถ้าสังเกตตามรูป สัญญาณ Low มักจะต่อ Source ของมอสเฟส ตัวนั้นกับ Ground เสมอ ส่วน High จะมีลักษณะ Ground ลอย การทำงานของชุดขับ ตัวที่สองจะทำงานในลักษณะที่เหมือนกับตัวที่หนึ่ง กล่าวคือ การทำงานของชุดขับ ตัวที่ 2 สัญญาณ High (G4 S4) จะต่อเข้ากับมอสเฟสตัวที่ 4 และ Low(G2 S2) จะต่อกับมอสเฟส ตัวที่ 2 ซึ่ง Source ของมอสเฟส ตัวที่ 2 จะ ต่อกับ Ground เสมอตามที่กล่าวข้างต้น

3.4.4 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงมีความสำคัญอย่างมากในการขับมอสเฟส กล่าวคือ ถ้าออกแบบอย่างไม่เหมาะสมแล้วนั้น บางครั้งกระแสอาจจะไม่พอสำหรับการใช้งาน ในการออกแบบแหล่งจ่ายไฟให้กับชิป ต่างๆนั้นเราจะให้หม้อแปลงแบบที่แปลงแรงดันขนาด 220 โวลท์ ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 15 โวลท์ และ 5 โวลท์ ตามลำดับ จากรูปด้านล่างจะเห็นว่าจะมีการแยกระบบอย่างชัดเจน โดยการแยกนี้นั้นต้องคำนึงถึง Ground ของระบบด้วย ว่าเราใช้ไฟเลี้ยงกับ ระบบใด ถ้าใช้กับ ARM7 LPC2138 เราก็ต้องทำการแยกหม้อแปลง ให้ไม่มีการต่อ Ground ร่วมกันกับระบบของ ไฟเลี้ยงทางด้าน กำลัง เนื่องจากถ้ามีการต่อทางไฟฟ้า หรือการเชื่อมเส้นถึงกัน ถ้ามีการลัดวงจร ระบบทั้งหมดจะพังหรือเกิดการเสียหายพร้อมกัน



ภาพประกอบที่ 3-8 วงจรไฟเลี้ยงกระแสตรง

การคำนึงถึงการออกแบบ หลักๆแล้วนั้นต้องมีการตรวจสอบการใช้งานไฟเลี้ยงในระบบให้ครบซะก่อน แล้วทำการออกแบบตัวปรับแรงดันว่าควรใช้งาน ตัวรักษาระดับแรงดันชนิดไหน ในที่นี้เราใช้ LM7815 เพื่อรักษาระดับแรงดัน 15 โวลท์ และ LM7805 เพื่อรักษาระดับแรงดันขนาด 5 โวลท์ โดยที่ต่อ LED ไว้ด้านท้ายเพื่อที่จะตรวจสอบระดับแรงดันว่าเริ่มใช้งานหรือยัง

3.5 หม้อแปลงความถี่สูง

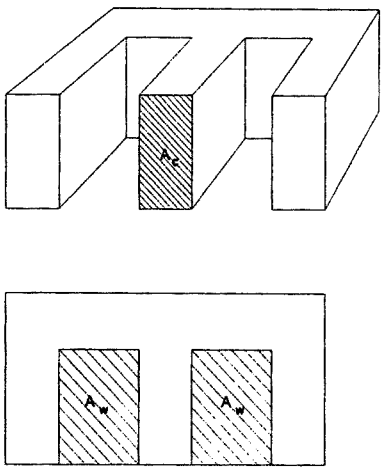
หม้อแปลงความถี่สูง มีความสำคัญต่อแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง เป็นอย่างมากเมื่อที่ต้องการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า สำหรับหัวข้อนี้จะอธิบายถึงหลักการ พื้นฐานของการออกแบบหม้อแปลงแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง ในวงจรของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งแบบฟลูบริดจ์ การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงโดยทั่วไปแล้วนั้น ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงนิยมที่จะใช้วิธีการออกแบบ แบบ Area product ซึ่งนิยามสมการได้ดังนี้

$$Ap = \text{Area product} = \text{core cross section}(Ac) \times \text{window area}(Aw)$$

เมื่อ Ac หมายถึง พื้นที่หน้าตัดของแกน (core area)

Aw หมายถึง พื้นที่ภายในกรอบว่างของแกน (window area)

ในกรณีที่เลือกใช้แกน E จะมีลักษณะตามภาพประกอบด้านล่าง



ภาพประกอบที่ 3-9 แกนเฟอร์ไรต์แบบ EE

จากสมการพื้นฐานของการคำนวณวงจรฟลูบริดจ์ แบบ Area product

$$A_P = A_C A_w = \frac{P_{O2}\left[\sqrt{2} + \frac{1}{\eta}\right]}{4JK_w B_m f_s} \qquad (3.5)$$

กำหนดให้ค่า K_w =0.4 n=0.8 เมื่อใช้งานกับวงจรฟลูบริดจ์ จะได้สมการใหม่เป็น

$$A_P = A_C A_w = \frac{P_{O2} \times 1.67}{JB_m f_s} \qquad (3.6)$$

จากการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆของวงจรฟลูบริดจ์ จะมีค่าตามรายละเอียดด้านล่าง

แรงดันเอาท์พุท	(Output voltage)	48	โวลท์
แรงดันริปเปิลเอาท์พุท	(Output ripple voltage)	10	เปอร์เซ็นต์
กระแสเอาท์พุท	(Output current)	10	แอมป์
ความถี่สวิตชิ่ง	(Switching frequency)	115	กิโลเฮิรตซ์
แรงดันอินพุท	(Input voltage)	310	โวลท์

ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด(B_m) ของแกนแบบเฟอร์ไรต์ นั้นจะมีค่าประมาณ 0.2 เทสลา และ ค่าของความหนาแน่นกระแส (J) มีค่า 3 A/mm^2 หรือ 3×10^6 A/m^2

การเลือกขนาดของแกน

จากการแทนค่าสมการ (3.6) จะได้

$$A_P = 12.1\times10^{-9}\ \text{m}^4 \quad \text{หรือ } 12{,}101\ \text{mm}$$

ทำการเลือกแกนเหล็กจากตารางในภาคผนวก 1 ให้ได้ Ap ในตารางที่มีค่ามากกว่าที่ได้จากการคำนวณ ดังนั้นเราจะได้แกนแม่เหล็กเบอร์ E36/18/11 ที่มีค่า Ap=1.41×10^4 mm^4

Ac=1.31×10^2 mm^2, Aw=1.41×10^2 mm^2

จำนวนรอบในการพัน

จำนวนรอบด้านปฐมภูมิ

$$N_1 = \frac{V_{ss,\max}}{4A_C B_m f_s} \qquad (3.7)$$

แทนค่าตัวแปรต่างๆลงในสมการเราจะได้

$$N_1 = 25.72 \text{ รอบ}$$

จากการคำนวณนั้นเราจะได้การพันทางด้านปฐมภูมิ ที่ 25.72รอบ เพราะฉะนั้นเราเลือกที่จะพันโดยการปัดเศษได้เท่ากับ 27 รอบ เนื่องจากหม้อแปลงนี้เป็นหม้อแปลงอัตรา 3:1 เพราะฉะนั้น เราจึงได้รอบทางด้านทุติยภูมิ เท่ากับด้านปฐมภูมิ คือ 9 รอบ เท่ากัน

การเลือกขนาดของขดลวดตัวนำ

ค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของกระแสมีค่าเท่ากับ

$$I_2 = I_o\sqrt{D_{\max}} = 6.71 \quad \text{A}$$

$$I_1 = nI_O = 30 \quad \text{A}$$

คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของขดลวดจาก $A_1=I_1/J$ และ $A_2=I_2/J$ แทนค่าตัวแปรต่างๆเราจะได้

$$A_1 = 10 \times 10^{-6} \qquad m^2$$

$$A_2 = 2.233 \times 10^{-6} \qquad m^2$$

จากภาคผนวกที่ 1 เราจะต้องเลือกลวดอาบน้ำยาที่ สูงกว่าโดยที่กำหนด ขดลวด SWG9(A_1=10.51mm^2) และ SWG15(A_2=2.62mm^2)

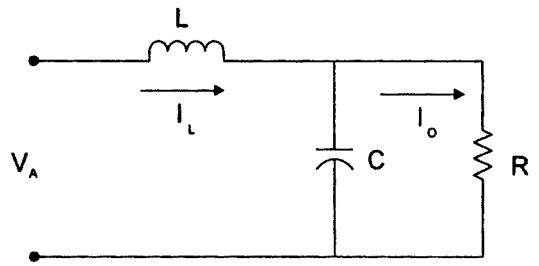
3.6 วงจรเรียงกระแสด้านเอาท์พุท พร้อมกับวงจรกรองแรงดัน

ในกรณีของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟลูบริดจ์ นั้นจะมีรูปแบบของแรงดันที่ด้านเอาท์พุท จะเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม ดังตัวอย่างที่กล่าวไปแล้วนั้น การส่งผ่านแรงดันที่ทางด้านอินพุทของหม้อแปลงความถี่สูง ที่ความถี่ 115 กิโลเฮิรตซ์ สัญญาณแรงดันที่เอาท์พุท ของหม้อแปลงนั้น ควรจะมีรูปร่างที่เหมือนแรงดันที่ป้อนเข้าด้านอินพุทเสมอ

เนื่องจากรูปแบบของสัญญาณมีความถี่สูงในระดับ 115 กิโลเฮิรตซ์ วงจรเรียงกระแสเอาท์พุท ก็ควรที่จะมีความเร็วสูง เพื่อตอบสนองระบบได้ การใช้งานในส่วนของการแปลงแรงดันที่มีรูปแบบของสัญญาณสี่เหลี่ยม นั้นจะต้องเลือกไดโอดที่มีลักษณะที่ตอบสนองความถี่นั้นๆได้

3.6.1 การออกแบบวงจรกรองแรงดัน RLC

เนื่องจากแรงดันที่ได้จากการใช้ วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟลูบริดจ์ จะอยู่ในรูปแบบของแรงดันที่เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมดังภาพประกอบที่ 3-10 ด้านล่าง ซึ่งเป็นกระแสสลับ ทั้งนี้ แรงดันที่เราต้องการเป็นรูปแบบของแรงดันกระแสตรง ที่มีค่าริปเปิลอยู่ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ของขนาดของกระแสด้านเอาท์พุท จึงต้องมีการกรองแรงดันมีสัญญาณของกระแสสลับออกไปเพื่อให้เหลือแต่ค่าแรงดันที่เป็นกระแสตรงเท่านั้น การกรองนั้นมีหลายรูปแบบ แต่แบบที่เป็นที่นิยมแพร่หลายมากก็คือการกรองแบบ Passive ที่ประกอบด้วยตัวกรองแบบ RLC



ภาพประกอบที่ 3-10 วงจรกรองแรงดันเอาท์พุทจากการออกแบบ

3.6.1.1การคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำ

คำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการสำหรับแหล่งจ่ายไฟสวิตชิ่งแบบฟลูบริดจ์

$$L = \frac{V_o(1 - D_{\min})}{\Delta I f_S} \tag{3.8}$$

เมื่อกำหนดให้ความต้องการของกระแสริปเปิล (ΔI) อยู่ที่ 10 เปอร์เซ็นต์ของกระแสโหลด

ดังนั้นเมื่อกำหนดกระแสโหลดอยู่ที่ 5 แอมป์ ΔI =0.5 แอมป์ โดยที่

$$D_{\min} = \frac{V_o}{V_{in,\max}} \tag{3.9}$$

เมื่อแทนค่าตัวแปรต่างจะได้ค่าตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ

$$L = 222.88\mu\text{H}$$

คำนวณหาผลคูณพื้นที่ (Ap)

เริ่มต้นคำนวณพลังงานสะสม

$$E = \frac{1}{2} L I_m^2 \tag{3.10}$$

โดย

$$I_m = I_o + \frac{\Delta I}{2} \tag{3.11}$$

แทนค่าสมการด้วยตัวแปรต่างๆ จะได้

$$E = 0.012\ \text{J}$$

สามารถแทนค่าสมการ Bm=0.2 เทสลา J=3A/mm^2 Kc=1 Kw=1

$$A_c = A_w A_c = \frac{2E}{K_w K_c J B_m} \qquad (3.12)$$

$$\text{Ap} = 4 \times 10^{-8}\ \text{m}^4 \text{ หรือ } 40{,}000\ \text{mm}^4$$

เลือกขนาดแกนจากภาคผนวกที่ 1 โดยเลือกค่าที่มีค่ามากกว่าค่าที่คำนวณได้ 40,000 mm^4จะได้แกนเบอร์ P42/26($\text{Ap}=4.77 \times 10^4\ \text{mm}^4$, $\text{Ac}=2.64 \times 100\ \text{mm}^2$,$\text{Aw}=1.81 \times 100\ \text{mm}^2$)

3.6.1.2 คำนวณหาค่าตัวเก็บประจุ

การกรองแรงดันเอาท์พุทให้อยู่ในรูปแบบของกระแสตรงนั้นเราจะต้องใช้ตัวเก็บประจุเป็นตัวกรอง เนื่องจากคุณสมบัติของตัวเก็บประจุ แล้วนั้นมีหน้าที่ในการกรอง แรงดันกระแสสลับ และทั้งนี้ริปเปิลเอาพุทของแรงดันจะขึ้นอยู่กับตัวแปรความถี่ และโหลดด้วย การคำนวณนี้มีความสำคัญมาก เนื่องจาก การป้อนสัญญาณกลับต้องอาศัย แรงดันที่มีค่าริปเปิล น้อยมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ จากสูตรด้านล่าง

$$C = \frac{V_o}{\Delta V_o} \cdot \frac{(1-D)}{8 f_s^{\,2} L} \qquad (3.13)$$

เมื่อแทนค่าตัวแปรต่างๆ จะได้ค่าตัวเก็บประจุ

$$C = 0.264\ \mu F$$

ที่แรงดันริปเปิล 10 เปอร์เซ็นต์จากการคำนวณแล้วนั้นค่าที่จะเลือกใช้งานต้องมีค่ามากว่า 0.264 μF

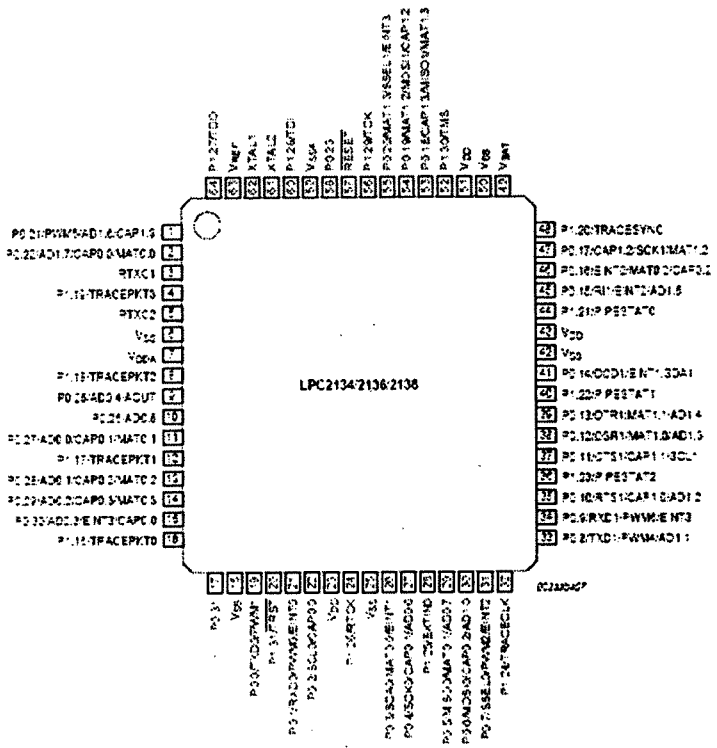
3.7 ตัวประมวลสัญญาณแบบ ARM7 LPC2138

ตัวประมวลสัญญาณ ARM7 โดยบริษัท Phillips ที่ใช้ในการควบคุมแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งนี้นั้น ทางผู้วิจัยได้ใช้รุ่น LPC 2138 ซึ่งจะมีความสามารถดังนี้

- 32 Bit Microprocessor based on RISC
- 512 KB Flash memory
- 32 Bit Static RAM (SRAM)
- ADC: Dual 8 channels 10 Bit (conversion time = 2.44 μs/channel)
- DAC: Single 10 Bit
- PWM: 6 channels single edge or 3 double edge

- 47 of GPIO pins (5V tolerance)
- UART: 2 Serial UART0 and UART1
- SPI: 4 Standard serial Interfacing
- I^2C: 2 fast serial interfacing 400kb/s

ภาพประกอบที่ 3-11 จะแสดงตัวประมวลสัญญาณ LPC2138 AMR7 โดยบริษัท Phillips โดยการประมวลสัญญาณจะใช้ พีดับเบิลยูเอ็ม เอาท์พุท ซึ่งมีด้วยกันทั้งหมด 6 ขา สามารถแบ่งการใช้งานเป็น Double edge 3 ขา



ภาพประกอบที่ 3-11 ตัวประมวลสัญญาณ LPC2138

การใช้งานแหล่งจ่ายไฟแบบฟลูบริดจ์นั้นจะมีสัญญาณที่ถูกนำมาใช้ประมวลสัญญาณเพียง 2 ขา คือ p0.7 และ p0.8 หรือ pwm2 และ pwm4 แบบ Double edge นั่นเอง ขนาดของแรงดันสัญญาณสี่เหลี่ยมที่ได้จากการโปรแกรมผ่านทาง ภาษาซีจะมีขนาดเพียง 3.3 โวลท์ การกำหนดค่า Duty cycle ของ พีดับเบิลยูเอ็ม จะถูกโปรแกรมให้มีค่าตามข้อกำหนด กล่าวคือ แรงดันที่เอาท์พุทของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งจะถูกควบคุมโดยตัวประมวลสัญญาณนั่นเอง

3.7.1 การแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล

การแปลงสัญญาณที่มีความต่อเนื่องของเวลาเป็นสัญญาณที่จะใช้กับตัวประมวลผลทางดิจิตอลนี้นั้น จำเป็นที่จะต้องมีการ Sampling ของสัญญาณที่ต่อเนื่องนั้นๆออกเป็นขั้นหรือการ

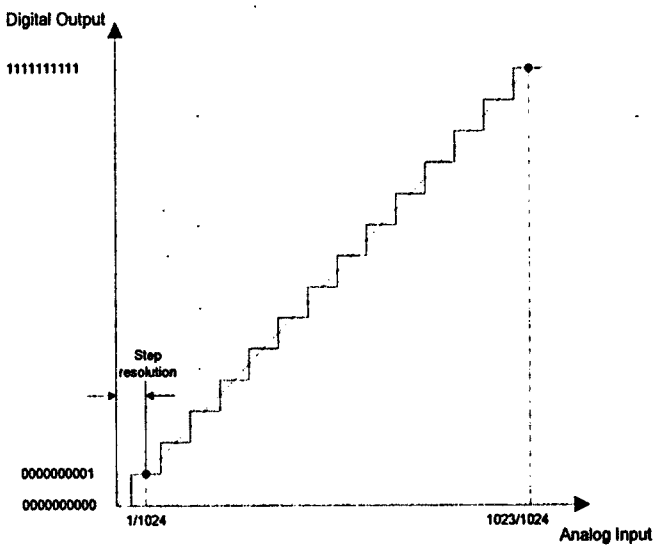
Sampling and Hold ค่านั้นๆไว้ เนื่องจาก LPC2138 AMR7 controller นั้นจะมี ขาสำหรับการแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลในตัวอยู่แล้ว แต่หลักการของการแปลงจะขึ้นอยู่กับการเขียนโปรแกรม และ การกำหนดค่าต่างๆในโปรแกรมนั้นๆ

การทำงานของตัวแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล นั้นจะอยู่ในรูปแบบของการรับค่าของแรงดันที่ระดับ 0-3.3 โวลท์ตามที่เรากำหนดตัวแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล ใน LPC2138 AMR7 controller นั้นมีขนาด 10 บิทซึ่งค่าสูงสุดของแรงดันเทียบเท่ากับ 3.3 โวลท์ ค่าของ Digital number จะมีค่าทั้งหมด 1024 ค่า ความละเอียดของแรงดันที่ได้จะอยู่ในรูปแบบสมการ(3.14)

$$ADC_{resolution} = \frac{V_{ref}}{2^n} \qquad (3.14)$$

$$ADC_{resolution} = 0.00322 \text{ โวลท์}$$

ความละเอียดของระดับแรงดันในการใช้งานตัวแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล ตามค่าที่คำนวณได้จะมีลักษณะตามภาพประกอบที่ 3-12



ภาพประกอบที่ 3-12 การแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล

ดังนั้นค่าที่เราจะได้สูงสุดที่ป้อนเข้าตัวแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล นั้นจะมีค่าเท่ากับ

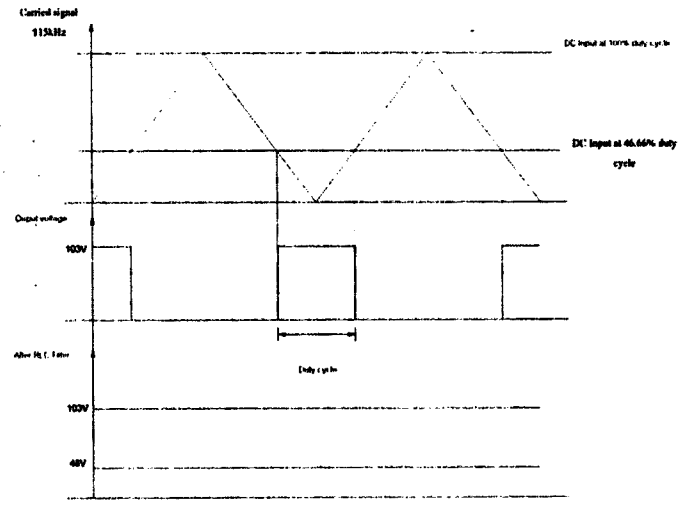
$$V_{IX`,\max} = \frac{V_{ref} \cdot 1023}{1024} = 3.296 \text{ โวลท์} \qquad (3.15)$$

การทำงานโดยการป้อนแรงดันย้อนกลับเข้าชุด พีดับเบิลยูเอ็ม ที่ขับมอสเฟสนั้นจะต้องป้อนผ่านโปรแกรมที่กำหนดระดับแรงดันที่เราต้องการ ในการออกแบบ smps นี้นั้น เราตั้งค่าที่จะป้อนกลับนั้นมีค่าเท่ากับระดับแรงดัน 48 โวลท์ เพราะฉะนั้น การกำหนดระดับแรงดันเป็นสิ่งสำคัญมากในการป้อนกลับ ทั้งนี้การต่อตัวแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลของวงจรที่ใช้งานอยู่ต้องพึ่งระวังเกี่ยวกับเรื่องของการ Float ของ Ground แรงดันที่เราทำการป้อนด้วย

3.7.2 สัญญาณป้อนกลับ

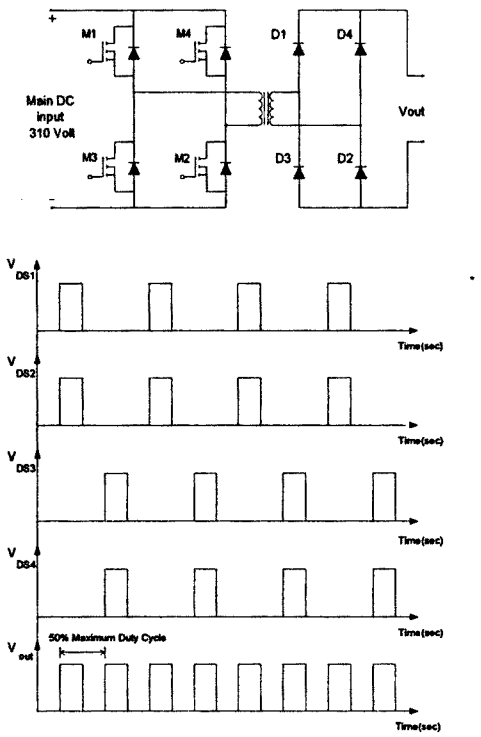
หลักทั่วไปของการส่งสัญญาณเข้าตัวควบคุมแบบ ARM7 เพื่อป้อนกลับนั้น เนื่องจากดังที่กล่าวมาแล้วว่าตัวแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล ของตัวควบคุมแบบ ARM7 นั้นประกอบอยู่ในตัวควบคุมและถูกจำกัดความสามารถในการรับแรงดันอยู่ที่ระดับ 0-3.3 โวลท์ดังนั้นการป้อนกลับของแรงดันที่เข้ามาควบคุมแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง หรือ Duty cycle ของมอสเฟสนั้นๆจะต้องลดระดับแรงดันลงมาเพื่อให้ตอบรับกับข้อกำหนดของ ตัวแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล ด้วย ดังตัวอย่างด้านล่างในการคำนวณการป้อนกลับของสัญญาณที่ระดับแรงดันสูงสุด

แรงดันจะมีค่าสูงสุดก็ต่อเมื่อแรงดันเอาท์พุท จะมีค่าเท่ากับ 103 โวลท์ หรือ Duty cycle 100 เปอร์เซ็นต์ และ แปรตามลำดับ คือ ถ้าแรงดันด้านออกมีค่า 48 โวลท์ ค่า duty cycle จะมีค่าเท่ากับ 48/103 คูณด้วย 100 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่าเท่ากับ 46.6 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพประกอบที่ 3-13



ภาพประกอบที่ 3-13 การเปรียบเทียบแรงดันกับสัญญาณสามเหลี่ยม

การทำงานของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง นั้นเราต้องการสัญญาณที่เหมือนกัน ความหมายก็คือเราต้องการสัญญาณที่เหมือนกันแต่มีมุมแตกต่างกันที่มุม 180 องศา ตามภาพประกอบที่ 3-14

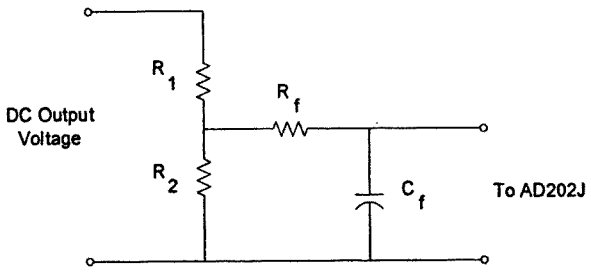


ภาพประกอบที่ 3-14 แรงดันด้านเอาท์พุทที่เกิดจากการสวิตชิ่งแบบฟลูบริดจ์

จากรูป 3-12 เราจะเห็นได้ว่าระดับแรงดันที่ป้อนกลับนั้นสูงสุดจะอยู่ที่ระดับ 3.3 โวลท์ ซึ่งมีค่าป้อนเข้าอนาลอกอยู่ 1024 แต่ระดับแรงดันที่แท้จริงจะถูกจำกัดให้มีระดับแรงดันที่ครึ่งเดียวคือ 1.75 โวลท์ เพื่อให้เกิดการสวิตท์ Duty cycle < 50 เปอร์เซ็นต์ ที่ไม่ทับกันระหว่าง M1 กับ M3 หรือ M4 กับ M2

จากที่กล่าวมาข้างต้นนั้นจะนำไปสู่การออกแบบป้อนกลับที่ต้องการจำกัด ค่าของแรงดันที่จะสามารถป้อนเข้าได้ ทั้งนี้นั้นการจำกัดแรงดันที่จะแบ่งแรงดันมา นั้นจะมีค่าที่ไม่ควรเกินค่า 1.75 โวลท์

ตามภาพประกอบที่ 3-15 นั้นจะทำการแปลงแรงดันที่มีขนาด 103 โวลท์เหลือแรงดันที่ 1.75 โวลท์ โดยใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้เป็นตัวปรับจูนความละเอียดของแรงดันที่จะป้อนกับเข้าตัวแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล การปรับค่าแรงดันนั้นจะถูกส่งผ่านเข้าตัวแยกทางไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ในการแยกทางไฟฟ้าระหว่างแรงดันเอาท์พุทและ ในส่วนของตัวประเมินผล LPC2138ตัวแยกทางไฟฟ้าตัวนี้นั้นเราเลือกใช้ AD202J ในระบบการป้อนกลับ เนื่องจากตัวแยกทางไฟฟ้าตัวนี้นั้นทำงานโดยการป้อนแรงดันด้านเอาท์พุทเป็นลักษณะค่าอิมพิแดนซ์สูงเมื่อมีการลัดวงจรที่ด้านเอาท์พุท กระแสการลัดวงจรนั้นจะไม่วิ่งไหลเข้ากลับไปใน LPC2138 ซึ่งป้องกันปัญหาที่จะตามมาในระบบ



ภาพประกอบที่ 3-15 วงจรการลดทอนแรงดันเพื่อใช้ในการป้อนกลับ

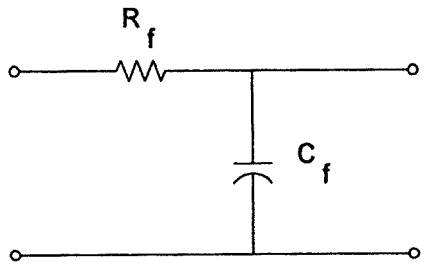
การคำนวณหาค่าตัวต้านทานต่างๆนั้นต้องคำนึงถึงค่าที่กำลังที่เหมาะสมให้กับตัวต้านทานนั้นๆด้วย จากสมการด้านล่างกำหนดให้

$$V_{sense} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{output} \qquad (3.16)$$

เมื่อกำหนดให้แรงดันที่ป้อนกลับ LPC2138 สูงสุดที่ 1.75 โวลท์ แรงดันด้านออก มีค่าเท่ากับ 103 โวลท์ คำนวนหาอัตราส่วนของค่าความต้านทานได้

$$R_1 = 58R_2$$

เมื่อเราทำการเลือกค่าความต้านทาน R_1 = 600 กิโลโอห์ม แทนในสมการแล้วนั้นจะได้ค่า ตัวต้านทานปรับค่าได้ขนาด 15 กิโลโอห์ม มาใช้งาน ส่วนค่าของตัวต้านทานและตัวเก็บประจุในการกรองแรงดันก่อนเข้า AD202J สามารถหาได้จากค่าดังนี้

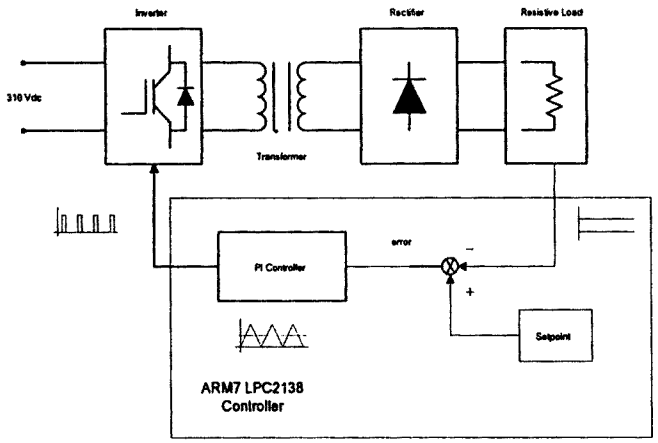


ภาพประกอบที่ 3-16 วงจรกรองแรงดันแบบ RC

3.8 การออกแบบตัวควบคุม พี ไอ ของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง

จากการออกแบบระบบเปิดที่ผ่านมานั้นขั้นตอนนี้เราจะมาสนใจในส่วนของการออกแบบระบบปิดที่มีการชดเชยค่าผิดพลาดด้วยตัวควบคุมแบบ พี ไอ จากภาพประกอบด้านล่าง แรงดันผิดพลาดจะถูกป้อนกลับผ่านทางตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลของ LPC2138 ซึ่งจะมีทำการเปรียบเทียบกับระดับแรงดันที่ตั้งไว้ในโปรแกรม ซึ่งทั้งนี้นั้นจะมี ตัวชดค่าความผิดพลาด จนให้ค่าความผิดพลาดนั้นมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ โดยรวมข องระบบแล้วนั้น ตัวควบคุมแบบ พีนั้นไม่สามารถ

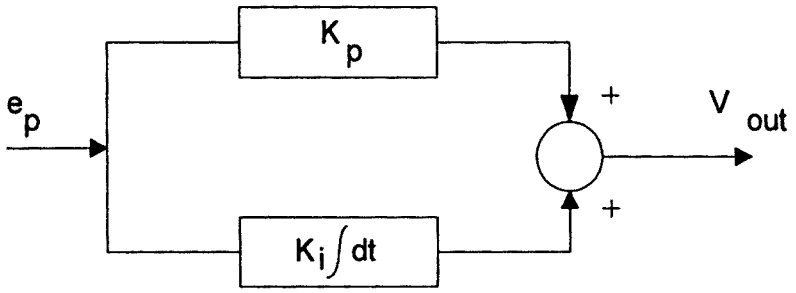
ทำงานตามลำพังได้โดยที่จะชดเชยค่าความผิดพลาดให้เป็นศูนย์ เพราะฉนั้นจึงต้องมีการเพิ่มตัวควบคุมแบบ ไอ ต่อ แบบขนานเข้าไปด้วยเพอื่ให้เกิดการชดเชยจนค่าความผิดพลาดสามารถเข้าเป็นศูนย์ได้



ภาพประกอบที่ 3-17 การป้อนกลับของสัญญาณลดทอนเพื่อใช้ในการควบคุม

การออกแบบเพื่อใช้งานในรูปแบบของการควบคุมโดยสัญญาณดิจิตอล นั้นจะต้องคำนึงถึงส่วนของการแปลงในรูปแบบตัวแปรเวลาให้อยู่ในรูปแบบของตัวแปรเชิงดิจิตอล จากสมการ 3.17 เป็นสมการของการต่อแบบขนานในแบบของตัวแปรตามเวลา

$$V_{out} = K_p e_p + K_i \int e_p dt + V_0(0) \qquad (3.17)$$



ภาพประกอบที่ 3-18 ตัวควบคุมแบบ Proportional และ Integral แบบต่อขนาน

ในที่นี้จะสามารถเขียนโปรแกรมเพื่อกำหนดให้ค่าของตัวควบคุมแบบ พี ไอนั้นอยู่ในรูปแบบของตัวแปรเชิงดิจิตอลได้ดังนี้

ในส่วนของตัวควบคุมแบบ Proportional นั้นสามารถแยกเขียนในตัวแปนเชิงเวลาได้ดังนี้

$$m(t) = K_p e_p(t) \tag{3.18}$$

ในเมื่อกำหนดให้ Kp คือค่าคงที่ เราสามารถแปลงให้อยู่ในรูปแบบของตัวแปรเชิงดิจิตอลได้ดังนี้

$$m_n = K_p e_n \tag{3.19}$$

ใช้สมการ Backward เราสามรถแปลงสมการให้อยู่ในรูปแบบของตัวแปรเชิงดิจิตอล ดังนี้

$$m_{n-1} = K_p e_{n-1} \tag{3.20}$$

ผลต่างของสมการ(3.19) และ(3.20) จะได้ดังสมการด้านล่าง(3.21)

$$\Delta m = m_n - m_{n-1} = K_p(e_n - e_{n-1}) \tag{3.21}$$

จากการเขียนโปรแกรมที่สั่งงานตัวประมวลสัญญาณ LPC2138นั้น เราจะใช้พื้นฐานจากสมการด้านบนเพื่อหาค่าของ $K_p e_p$

ตัวควบคุมแบบ Integral จะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของตัวแปรเชิงเวลา ได้ดังรูปแบบสมการด้านล่างโดยการอินทิเกรตค่าของความผิดพลาด

$$m(t) = K_i \int e_p(t)dt \tag{3.22}$$

หลังจากการแปลงตัวแปรเชิงเวลาให้อยู่ในรูปแบบของ ตัวแปรเชิงดิจิตอลแล้วนั้นเราจะได้รูปแบบของสมการดังสมการ(3.27) ที่เกิดจากผลคูณของ e_p กับ Sampling time ณ. ที่จุด Sampling ต่างๆกัน

$$m_n = K_i \sum_{j=1}^{n} Te_j \tag{3.23}$$

เรานำมาเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปแบบที่ง่ายขึ้น จะได้ดังสมการ (3.24)

$$m_n = K_i \sum_{j=1}^{n-1} Te_j + K_i Te_n \tag{3.24}$$

ในกรณีที่

$$m_{n-1} = K_i \sum_{j=1}^{n-1} Te_j \tag{3.25}$$

ผลต่างของสมการ(3.24) และ (3.25) จะได้ดังสมการด้านล่าง (3.26)

$$\Delta m_n = m_n - m_{n-1} = K_i T e_n \qquad (3.26)$$

ดังสมการที่ได้กล่าวข้างต้นแล้วนั้น เราสามารถหาผลรวมของ ตัวควบคุมแบบ พี ไอ เพื่อเขียนในโปรแกรมสั่งงาน LPC2138 ได้ดังนี้

$$\Delta m_n = (\Delta m_n)_P + (\Delta m_n)_I \qquad (3.27)$$

รวมสมการที่(3.21) กับ (3.26) เราจะได้สมการในรูปตัวแปรเชิงดิจิตอลเป็นสมการดังนี้

$$\Delta m = m_n - m_{n-1} = K_p(e_n - e_{n-1}) + K_i T e_n \qquad (3.28)$$

$$\Delta m = (K_p + K_i T)e_n - K_p e_{n-1} \qquad (3.29)$$

$$m_n = m_{n-1} + (K_p + K_i T)e_n - K_p e_{n-1} \qquad (3.30)$$