พระบรมราชูปถัมภ์ สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

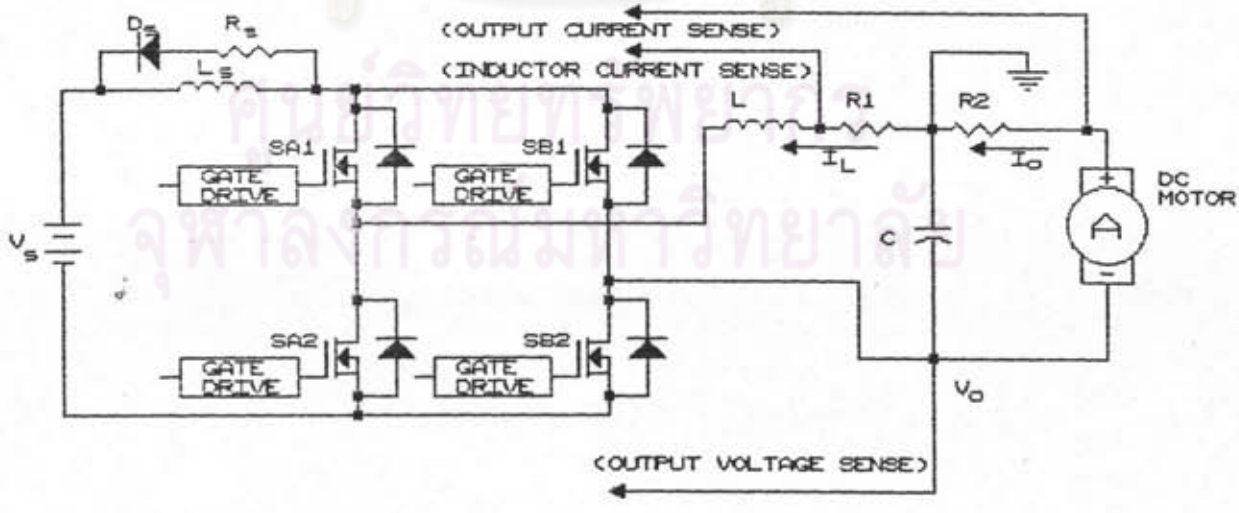
บทที่ 4

การสร้างวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรง

จากบล็อกไดอะแกรมของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงในรูปที่ 3.1 และ 3.2 สามารถแทนส่วนต่างๆในบล็อกไดอะแกรมดังกล่าวด้วยวงจรในทางปฏิบัติที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆทางอิเล็กทรอนิกส์โดยรายละเอียดของวงจรแต่ละส่วนจะเป็นดังต่อไปนี้

4.1 วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง

รูปที่ 4.1 เป็นโครงสร้างของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ซึ่งมีส่วนประกอบเพิ่มเติมจากที่กล่าวบ้างแล้วในหัวข้อที่ 3.1.1 เพื่อให้เหมาะสมกับทางด้านปฏิบัติ ซึ่งได้แก่สนับเบอร์กระแส LRD ที่ต่อทางด้านเข้าของวงจรบริดจ์เพื่อลดค่ายอดของกระแสที่ผ่าน POWER MOSFET ที่ใช้เป็นสวิตช์ อันเนื่องมาจากกระแสอิ่มตัวย้อนกลับของไดโอดในช่วงที่เปลี่ยนการนำกระแสจากไดโอดเป็น MOSFET ในกิ่งเดียวกันของวงจรบริดจ์



รูปที่ 4.1 วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ที่ใช้ในทางปฏิบัติ

ในบทที่ 3 ได้แสดงการออกแบบวงจรกรองและค่าความต้านทานที่ใช้ในการตรวจจับกระแสในตัวเหนี่ยวนำ และกระแสออกของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรง นอกจากนี้ยังได้แสดงให้เห็นการวางตำแหน่งตัวต้านทานที่ใช้ในการตรวจจับกระแสในตัวเหนี่ยวนำ (R_1), การวางตำแหน่งตัวต้านทานที่ใช้ในการตรวจจับกระแสออก (R_2)ซึ่งกำหนดให้ใช้ R_1=0.02 โอห์ม , R_2=0.02 โอห์ม ดังในหัวข้อที่ 3.2.4 ในรูปที่ 4.1 ยังแสดงชื่อของสัญญาณที่ใช้ในการตรวจจับกระแสในตัวเหนี่ยวนำ (INDUCTOR CURRENT SENSE), สัญญาณที่ใช้ในการตรวจจับกระแสออก (OUTPUT CURRENT SENSE), สัญญาณที่ใช้ในการตรวจจับแรงดันออก (OUTPUT VOLTAGE SENSE) สัญญาณทั้ง 3 นี้จะถูกนำไปต่อกับวงจรควบคุมในรูปที่ 4.4 ต่อไป ตัวต้านทาน R_1 ทำจากตัวต้านทานแบบ wire wound ขนาด 5 วัตต์ ค่า 1 โอห์ม จำนวน 5 ตัวขนานกัน กำลังสูญเสียที่ตัวตัวต้านทานสูงสุดเท่ากับ 9.4 วัตต์ สำหรับอุปกรณ์ของวงจรกรอง LC ตามการออกแบบค่าในหัวข้อที่ 3.2.2, 3.2.3 ต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำ (L) ขนาด 0.7 มิลลิเฮนรี รับกระแสสูงสุดได้ 21.5 แอมแปร์ ได้เลือกใช้ตัวเหนี่ยวนำขนาด 0.7 มิลลิเฮนรี ที่รับกระแสสูงสุดได้ 30 แอมแปร์ เป็นการเผื่อกระแสเกินพิกัดได้ประมาณ 1.4 เท่า ส่วนตัวเก็บประจุ C จะใช้ C แบบ MKP ขนาด 22 ไมโครฟารัด 400 โวลต์กระแสตรง 220 โวลต์กระแสสลับ จำนวน 2 ตัว ต่อขนานกับตัวเก็บประจุขนาด 11 ไมโครฟารัด 400 โวลต์กระแสตรง 220 โวลต์กระแสสลับ จำนวน 1 ตัว จะได้ค่า 54 ไมโครฟารัด ตามต้องการ

4.1.1 <u>การเลือกขนาดของสวิตช์</u> กระแสที่ผ่านสวิตช์จะมีค่าสูงสุดประมาณเท่ากับ 21.5 แอมแปร์ ซึ่งเป็นกระแสเฉลี่ย 20 แอมแปร์ และผลจากการกระเพื่อมของกระแสอีก 1.5 แอมแปร์ และต้องทนแรงดันได้อย่างน้อย 140 โวลต์ อย่างไรก็ดีเมื่อคำนึงถึงผลของกระแสอิ่มตัวย้อนกลับของไดโอด การเกิดแรงดัน spike และการกระเพื่อมของแรงดันเข้าตลอดจนอุปกรณ์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด จึงเลือก POWER MOSFET เบอร์ MG15G4GMI ของโตชิบา ซึ่งใน 1 module จะมีสวิตช์ 4 ตัวต่อกันเป็นวงจรบริดจ์ โดยแต่ละตัวมีพิกัดกระแส 15 แอมแปร์ ทนแรงดันได้ 450 โวลต์ เนื่องจากกระแสสูงสุดของ MOSFET ที่หาได้ต่ำกว่าพิกัดที่ต้องการ จึงจำเป็นต้องนำมาขนานกัน 2 ตัวเพื่อให้ทนกระแสได้ 30 แอมแปร์ เป็นการเผื่อไว้ประมาณ 1.4 เท่า ส่วนพิกัดของแรงดันจะมีค่าสูงเกินความจำเป็นค่อนข้างมากคือประมาณ 3 เท่า เนื่องจากไม่สามารถซื้อหา

อุปกรณ์ที่มีพิกัดเหมาะสมได้

4.1.2 <u>การออกแบบสนับเบอร์กระแส</u> จากข้อมูลของสวิตช์ค่า recovery time ของไดโอดเท่ากับ 1 ไมโครวินาที เพื่อความปลอดภัยให้กระแสสูงสุดในสวิตช์เท่ากับ 30 แอมแปร์

จาก $V = L.di/dt$

เมื่อให้ V = 150 โวลต์ (จากการเลือกแรงดันไฟตรงในหัวข้อ 4.7.2)

ดังนั้น $L_s = 150x1x10^{-6}/30 = 5$ ไมโครเฮนรี

เมื่อออกแบบตาม [Middlebrook, 1981] และทดลองพันลวดขนาด 4 mm^2 บนแกนอากาศ จำนวน 15 รอบ จะได้ $L_s = 5.4$ ไมโครเฮนรี

สำหรับค่าตัวต้านทาน R_s หาได้จากเงื่อนไขที่ จะต้องทำให้พลังงานสะสมในตัวเหนี่ยวนำ (L_s) หมดก่อนการนำกระแสครั้งถัดไปของสวิตช์ เมื่อวัฏจักรงานสูงสุดเท่ากับ 0.95 และ ความถี่ในการสวิตช์เท่ากับ 20 กิโลเฮิรตช์ ทำให้สามารถคำนวณค่าตัวต้านทานได้จากสมการที่ให้ช่วงการหยุดนำกระแสเป็น 6 เท่าของค่าคงตัวเวลา (time constant) คือ

$$6.L_s/R_s = 0.05 \times 1/(20x10^{-3}) = 2.5x10^{-6} \text{ วินาที}$$

จะได้ $$R_s = 5.4x10^{-6}x6/2.5x10^{-6} = 12.96 \text{ โอห์ม}$$

แต่ในทางปฏิบัติหาค่าความต้านทานที่ใกล้เคียงได้เพียง 14.3 โอห์ม โดยนำตัวต้านทานแบบ wire wound 100 โอห์ม 10 วัตต์ จำนวน 7 ตัว มาต่อขนานกัน ส่วนกำลังสูญเสียที่ตัวต้านทาน R_s จะมีค่าสูงสุดโดยประมาณตามสมการ

$$P = (1/2).L.(I_p)^2.f_s = (1/2)x5.4x(21.5)^2x20x10^3 = 25 \text{ วัตต์}$$

ดังนั้นตัวต้านทานที่เลือกจึงเพียงพอ

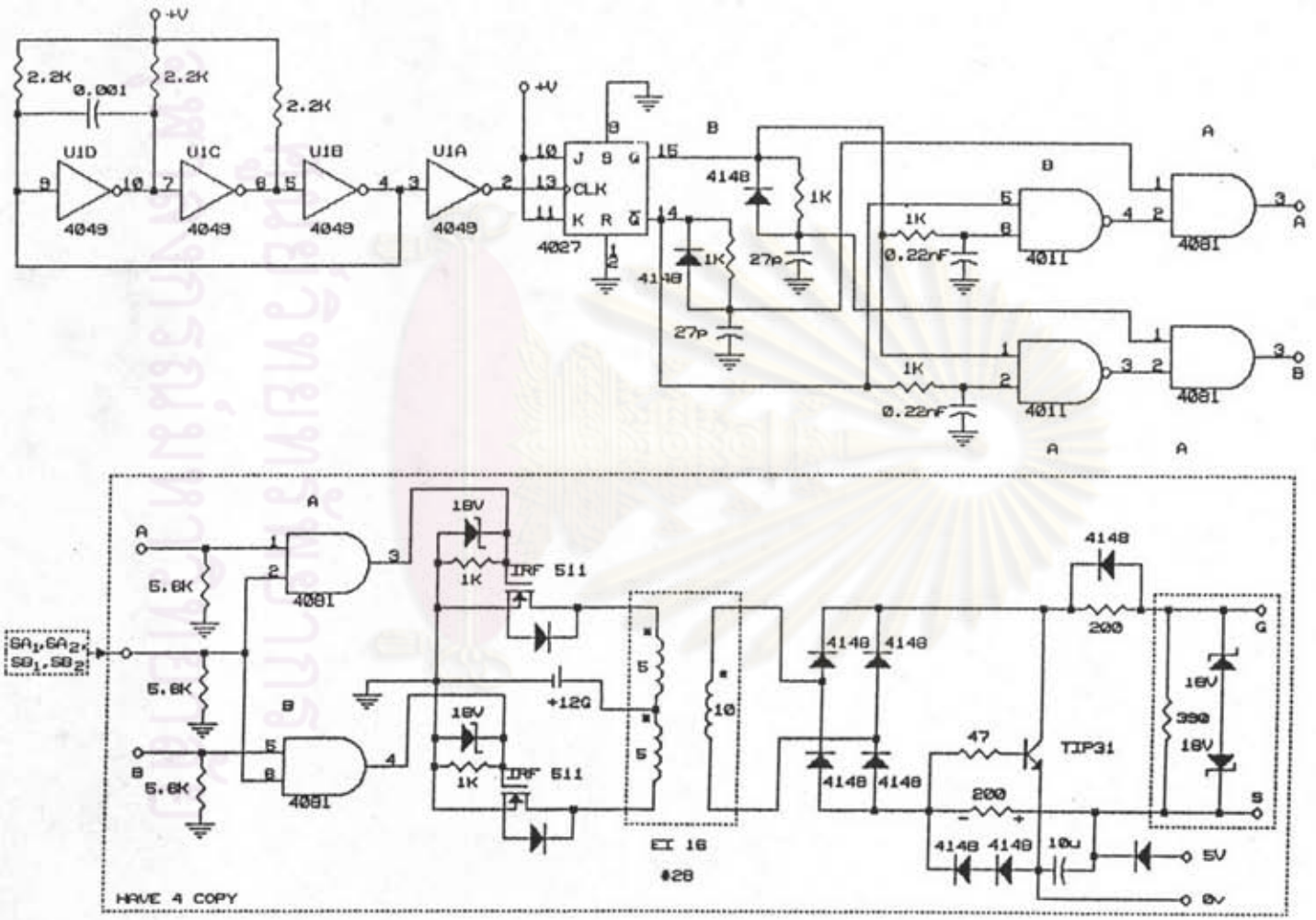
ส่วนไดโอด D_s ใช้ไดโอดที่ความเร็วสูงเบอร์ MR 826 จำนวน 6 ตัวต่อขนานกัน ซึ่งจะทำให้ทนกระแสได้ 30 แอมแปร์ ทนแรงดันได้ 600 โวลต์

4.1.3 <u>วงจรขับนำเกต</u> (gate drive) เมื่อเลือก MOSFET

เป็นสวิตช์หลักจึงต้องใช้วงจรขับนำเกตเป็นวงจรขับนำสวิตช์ จากการที่วงจรกำลังเป็นวงจรบริดจ์ จึงต้องมีวงจรขับนำเกตถึง 4 ชุด เพื่อความสะดวกจึงเลือกวงจรขับนำเกตแบบแยกโดดซึ่งเชื่อมโยงถึงกันด้วยหม้อแปลงความถี่สูง วงจรขับนำเกตที่ใช้แสดงอยู่ในกรอบสี่เหลี่ยมเส้นประในรูปที่ 4.2 การใช้หม้อแปลงเป็นตัวแยกโดดจะมีปัญหาเมื่อวัฏจักรงานมีการเปลี่ยนแปลงค่าในช่วงกว้างคือปัญหาการ reset ของสนามแม่เหล็กที่ค่าวัฏจักรงานสูงและปัญหาการไบแอสย้อนของ gate ที่มีวัฏจักรงานต่ำ จึงจำเป็นต้องผสมความถี่สูงกว่าความถี่ในการสวิตช์ของวงจรกำลัง (20 กิโลเฮิรตซ์) เข้าไปในสัญญาณคำสั่งจากวงจรตรรก (SA_1, SA_2, SB_1, SB_2) โดยถ้าสัญญาณเหล่านี้ตัวใดตัวหนึ่งมีค่าเป็น 1 ก็หมายถึงวงจรขับนำเกตชุดนั้นทำงาน การผสมสัญญาณก็ทำได้โดยอุปกรณ์ตรรก AND 2 ตัวทางด้านซ้ายมือ สัญญาณออกจาก AND gate จะนำไปขับนำ MOSFET เบอร์ IRF 511 ของวงจรพุช-พูล ในตอนที่ต้องการขับนำให้ POWER MOSFET นำกระแส สัญญาณออกของหม้อแปลงจะเป็นไฟสลับ จะถูกเปลี่ยนเป็นไฟตรงโดยวงจรบริดจ์ไดโอดที่ประกอบด้วยไดโอดเบอร์ 1N4148 4 ตัว เพื่อนำไปขับนำเกตของ POWER MOSFET ส่วนทรานซิสเตอร์และตัวเก็บประจุ 10 ไมโครฟารัดจะช่วยดึงแรงดันเกตให้มีค่าลบในเวลาที่ต้องการให้ POWER MOSFET หยุดนำกระแส สัญญาณออกของวงจรขับนำเกตจะมีขนาดประมาณ + 9 โวลต์ ในช่วงที่ขับนำให้ POWER MOSFET นำกระแสและมีค่า - 5 โวลต์ในตอนควบคุมให้ POWER MOSFET หยุดนำกระแส วงจรขับนำเกต 1 ชุดที่กล่าวมาจะขับสวิตช์ได้เพียง 1 ตัว ดังนั้นจึงต้องมีวงจรขับนำเกต 4 ชุด โดยแต่ละชุดจะใช้สัญญาณความถี่ผสมร่วมกัน วงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ผสม คือ ส่วนที่อยู่นอกกรอบสี่เหลี่ยมเส้นประในรูปที่ 4.2

สัญญาณความถี่ดังกล่าวสร้างจาก Not gate 3 ตัว ทางด้านซ้ายมือ โดยมีความถี่ประมาณ 2 เมกะเฮิรตซ์ แล้วทำให้เป็นสัญญาณความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ โดยใช้ฟลิปฟลอปแบบที [โคทม อารียา, 2526] ร่วมกับวงจรเกต ซึ่งทำให้สัญญาณออก A,B มีค่าที่ตรงข้ามกัน โดยมี deadtime ระหว่างกัน ทำให้สัญญาณ A,B มีวัฏจักรงานประมาณ 0.45

ส่วนหม้อแปลงความถี่สูงดังกล่าวข้างต้นจะใช้แกนเฟอร์ไรต์ EI เบอร์ 16 เป็นแกนแม่เหล็กเป็นแกนแบบ ใช้ขดลวดเบอร์ SWG 26 ทั้งปฐมภูมิและทุติยภูมิ จำนวนรอบทางปฐมภูมิเท่ากับ 5 รอบทั้ง 2 ขด ทางทุติยภูมิมีจำนวนรอบเท่ากับ



รูปที่ 4.2 วงขับเกตและวงจรสร้างสัญญาณความถี่ผสม

10 รอบ ออกแบบตาม [Middlebrook, 1981] ในการพันจะพันขดทุติยภูมิก่อนเพื่อลดปัญหาการรั่วของเส้นแรงแม่เหล็ก

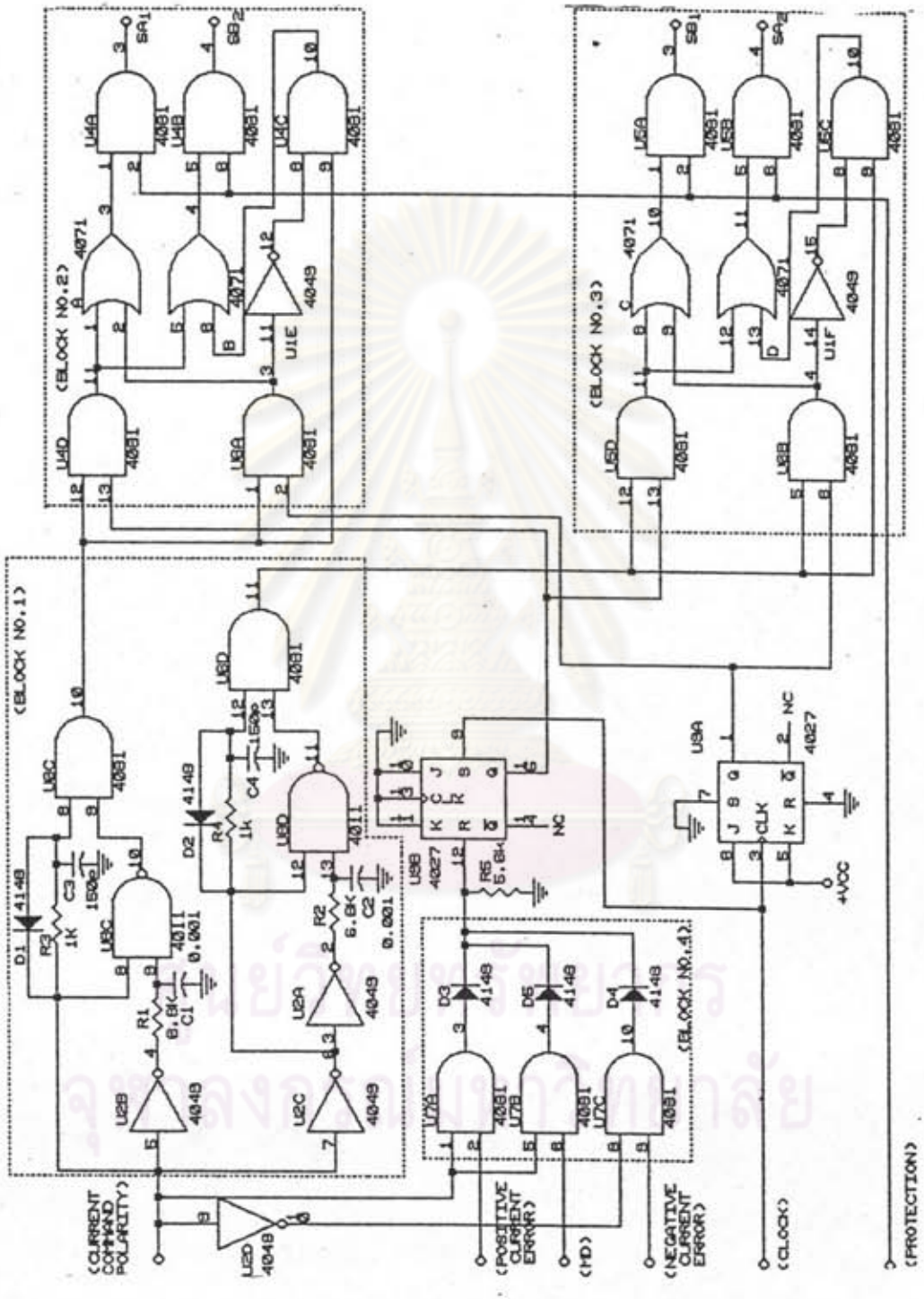
4.2 วงจรเปรียบเทียบและควบคุมกระแสของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง

เป็นวงจรที่ทำหน้าที่ในการควบคุมกระแสในตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงให้มีค่าสูงสุดเท่ากับสัญญาณคำสั่งกระแสและมีความถี่คงที่ โดยจะให้สัญญาณออกเป็นสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมการขับนำสวิตช์ของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงดังได้กล่าวมาแล้ว วงจรที่ทำหน้าที่เปรียบเทียบและควบคุมกระแสในตัวเหนี่ยวนำนี้ประกอบด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่ต่าง ๆ ดังนี้คือ

4.2.1 วงจรตรรก จากข้อกำหนด หน้าที่และส่วนประกอบของวงจรตรรกตามที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่ 3.1.2.1 จึงได้ออกแบบวงจรตรรกโดยใช้อุปกรณ์ตรรกจำพวก CMOS ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งแบ่งเป็นส่วนประกอบย่อย 4 ส่วน ตามหน้าที่ต่าง ๆ ดังนี้

4.2.1.1 วงจรกำหนดช่วงเวลาการทำงานของสวิตช์

ทำหน้าที่ให้กำเนิดสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมช่วงเวลาการทำงานของสวิตช์ โดยใช้ S-R flipflop เบอร์ 4027 (U9B) เป็นตัวกำเนิดสัญญาณ โดยใช้สัญญาณนาฬิกาที่ต่อเข้ากับขา SET ของฟลิปฟลอปเป็นตัวกำเนิดสัญญาณเริ่มนำกระแสของสวิตช์ โดยเมื่อสัญญาณนาฬิกาเปลี่ยนค่าจาก 0 เป็น 1 จะทำให้สัญญาณออกที่ขา Q ของ U9B มีค่าเป็น 1 ทำให้สวิตช์นำกระแส สัญญาณออกของ Q นี้จะคง 1 ไว้จนกว่าขา RESET (2 ของ U9B) จะได้รับสัญญาณจากวงจรควบคุมการหยุดการนำกระแสของสวิตช์ใน block no.4 โดยเมื่อสัญญาณควบคุมการหยุดนำกระแสเปลี่ยนจาก 0 เป็น 1 ก็จะทำให้สัญญาณออกที่ขา Q ของ U9B เปลี่ยนค่าจาก 1 เป็น 0 สัญญาณออกที่ขา Q ของ S-R flipflop (U9B) จะเป็นสัญญาณที่จะนำไปควบคุมการนำหรือหยุดนำกระแสของสวิตช์โดยจะส่งต่อไปยังวงจรควบคุมการขับนำสวิตช์ใน block no.2 และ block no.3 ถ้าสัญญาณที่ขา Q ของ U9B มีค่าเป็น 1 ก็หมายถึงให้สวิตช์มีการนำกระแส ถ้าเป็น 0 ก็จะหมายถึงให้สวิตช์มีการหยุดนำกระแส แต่การที่สวิตช์ในกลุ่มใดจะนำกระแสนั้นจะถูกควบคุมโดยวงจรใน block no.1 ผ่านวงจรใน block no.2 และ block no.3



รูปที่ 4.3 วงจรจริง

ตามลำดับ วงจรใน block no.1 นอกจากจะเป็นตัวกำหนดกลุ่มของสวิตช์ที่นำกระแสแล้ว ยังมีวงจรหน่วงเวลาการเปลี่ยนกลุ่มสวิตช์ที่นำกระแสรวมอยู่ด้วย ดังได้กล่าวมาแล้ว ในภาวะปกติการหยุดนำกระแสของสวิตช์จะทำตามหลักการควบคุมลำดับการทำงานของสวิตช์จะเป็นแบบ limited unipolar และจะเปลี่ยนไปเป็นแบบ bipolar เมื่อลำดับการทำงานของสวิตช์แบบ limited unipolar ไม่สามารถจะจำกัดกระแสออกได้

4.2.1.2 <u>วงจรควบคุมการหยุดนำกระแสของสวิตช์</u> ทำหน้าที่เลือกสัญญาณที่ใช้ในการกำหนดการหยุดนำกระแสเพื่อป้อนแก่ขา RESET ของ U9B ซึ่งเป็นวงจรประมวลที่ควบคุมช่วงเวลาการทำงานของสวิตช์ วงจรควบคุมการหยุดนำกระแสของสวิตช์ แสดงอยู่ใน block no.4 ของรูปที่ 4.3 สัญญาณที่ถูกเลือกก็ได้แก่ สัญญาณ POSITIVE CURRENT ERROR, NEGATIVE CURRENT ERROR จากวงจรเปรียบเทียบกระแสและสัญญาณ MD จากวงจรกำหนดวัฏจักรงานสูงสุดในภาวะปกติซึ่งกระแสในตัวเหนี่ยวนำสามารถเพิ่มค่าขึ้นไปเท่ากับกระแสอ้างอิงได้ในหนึ่งคาบการทำงานแล้ววงจรควบคุมการหยุดนำกระแสจะเลือกสัญญาณ POSITIVE CURRENT ERROR หรือ NEGATIVE CURRENT ERROR ในการควบคุมการหยุดนำกระแสโดยใช้CURRENT COMMAND POLARITY เป็นเกณฑ์ในการเลือก ถ้าสัญญาณ CURRENT COMMAND POLARITY มีค่าเป็น 1 ก็หมายถึงต้องการให้กระแสในตัวเหนี่ยวนำเป็นบวก U7A จะถูก enable แต่ U7C จะถูก disable สัญญาณ POSITIVE CURRENT ERROR จะถูกป้อนแก่ขา RESET ของ U9B แต่ถ้าสัญญาณ CURRENT COMMAND POLARITY มีค่าเป็น 0 ก็หมายถึงต้องการให้กระแสในตัวเหนี่ยวนำเป็นลบ U7A จะถูก disable แต่ U7C จะถูก enable สัญญาณ NEGATIVE CURRENT ERROR จะถูกเลือกป้อนแก่ขา RESET ของ U9B แทน

แต่กรณีที่สัญญาณ NEGATIVE CURRENT ERROR หรือ POSITIVE CURRENT ERROR ถูกเลือกแล้วแต่ไม่สามารถมีค่าเป็น 1 ได้ภายในเวลา 47.5 ไมโครวินาที ซึ่งกำหนดโดยวัฏจักรสูงสุดเท่ากับ 0.95 อันเนื่องมาจากกระแสในตัวเหนี่ยวนำไม่สามารถเพิ่มค่าขึ้นไปเท่ากับกระแสอ้างอิงในหนึ่งคาบการทำงานของสวิตช์แล้ว สัญญาณที่ขา RESET ของ U9B ก็จะถูกเปลี่ยนให้เป็น 1 ที่เวลา 47.5 ไมโครวินาทีของทุกคาบเวลา โดยสัญญาณ MD เนื่องจากลักษณะของสัญญาณ MD ที่กล่าวในหัวข้อ 3.1.2.6

4.2.1.3 <u>วงจรหน่วงเวลาการเปลี่ยนกลุ่มสวิตช์ที่นำกระแส</u> ทำหน้าที่หน่วงเวลาการเปลี่ยนกลุ่มสวิตช์ที่จะนำกระแสเมื่อมีการเปลี่ยนทิศทางของสัญญาณอ้างอิงของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ เช่น ทำการหน่วงเวลาไม่ให้กลุ่มสวิตช์ SA1, SB2 นำกระแสเป็นเวลาหนึ่ง หลังจากสั่งให้กลุ่มสวิตช์ SA2, SB1 หยุดนำกระแสแล้ว หรือ ทำการหน่วงเวลาไม่ให้กลุ่มสวิตช์ SA2, SB1 นำกระแสเป็นเวลาหนึ่ง หลังจากสั่งให้กลุ่มสวิตช์ SA1,SB2 หยุดนำกระแสแล้ว วงจรที่ทำหน้าที่นี้แสดงอยู่ใน block no.1 ของรูปที่ 4.3 สัญญาณออกของวงจรหน่วงเวลาการเปลี่ยนกลุ่มสวิตช์ที่นำกระแสจะถูกควบคุมโดยสัญญาณCURRENT COMMAND POLARITY กล่าวคือในภาวะอยู่ตัวเมื่อสัญญาณ CURRENT COMMAND POLARITY มีค่าเป็น 1 จะทำให้สัญญาณออกของ U6C และ U6D มีค่าเป็น 1 และ 0 ตามลำดับ ลักษณะดังกล่าวจะทำให้สวิตช์ SA1, SB2 นำกระแสเมื่อได้รับสัญญาณนาฬิกา แต่เมื่อสัญญาณ CURRENT COMMAND POLARITY มีค่าเป็น 0 ทำให้สัญญาณออกของ U6C และ U6D มีค่าเป็น 0 และ 1 ตามลำดับ ลักษณะดังกล่าวจะทำให้สวิตช์ SA1 และ SA2 นำกระแส เมื่อได้รับสัญญาณนาฬิกา เมื่อพิจารณาในช่วงเวลาการเปลี่ยนค่าของสัญญาณ CURRENT COMMAND POLARITY จาก 0 เป็น 1 สัญญาณออกของ U6D จะมีค่าเปลี่ยนจาก 1 เป็น 0 ในเวลาที่รวดเร็ว โดยเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนค่าขึ้นกับความเร็วของวงจรเกตที่ใช้และวงจรหน่วงเวลา $R_4C_4D_2$ ซึ่งมีไว้เพื่อชดเชยเวลาที่ NAND gate (U8D) ต้องใช้ในการเปลี่ยนค่าจาก 1 เป็น 0 เมื่อสัญญาณ CURRENT COMMAND POLARITY มีค่าเปลี่ยนจาก 1 เป็น 0 ส่วนสัญญาณออกของ U6C จะมีการหน่วงเวลาในการเปลี่ยนค่าจาก 0 เป็น 1 ด้วยวงจรกรอง R_1C_1 ซึ่งจะทำการหน่วงเวลาไว้ประมาณ 5 ไมโครวินาที สำหรับวงจร $R_3C_3D_1$ นั้นมีหน้าที่เหมือนกับวงจร $R_4C_4D_2$ ส่วนสัญญาณออกของ U6D จะมีการหน่วงเวลาการเปลี่ยนค่าจาก 0 เป็น 1 ด้วยวงจรกรอง R_2C_2 ซึ่งกันหน่วงเวลาไว้ประมาณ 5 ไมโครวินาที

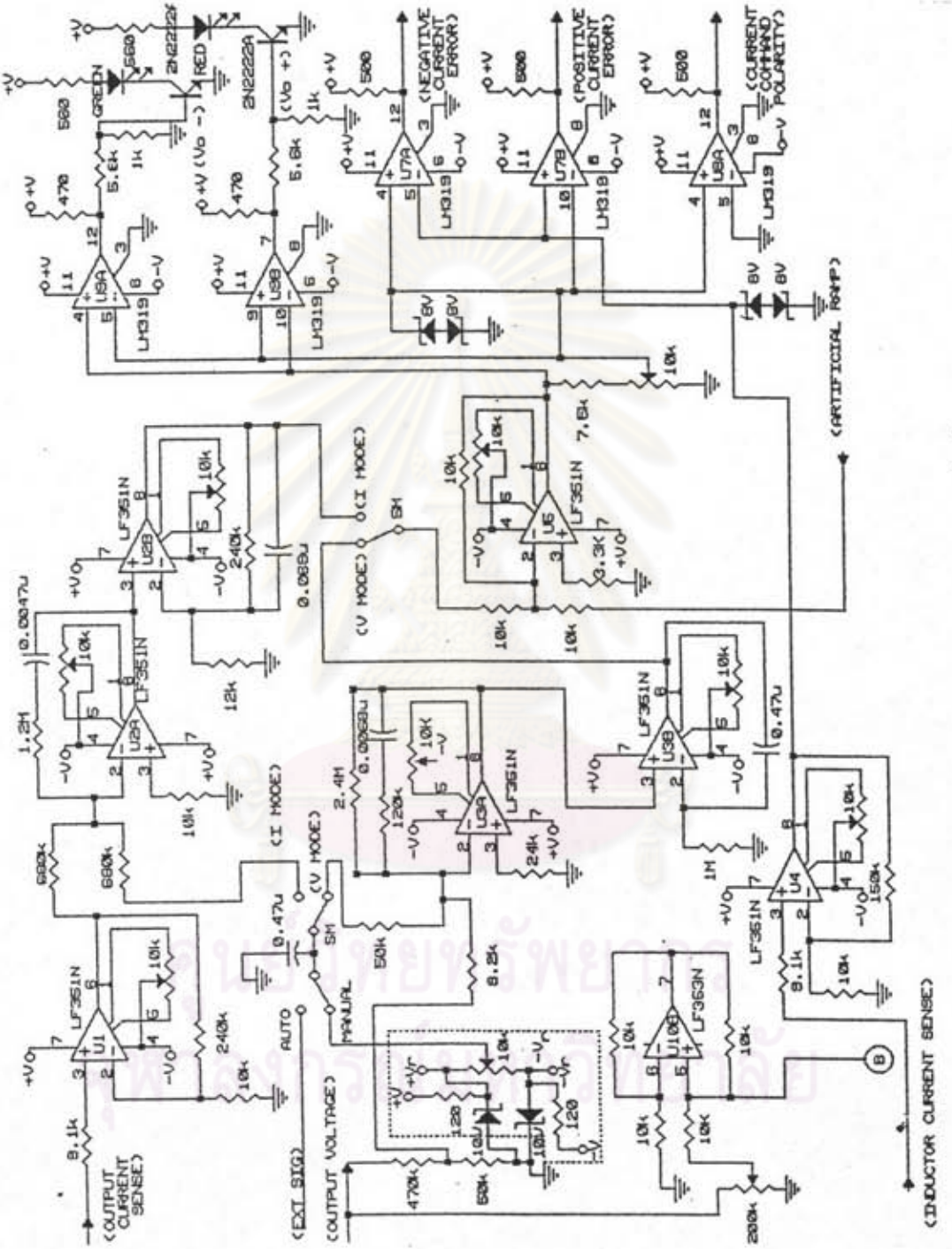
4.2.1.4 <u>วงจรเฉลี่ยกำลังสูญเสียในสวิตช์และวงจรควบคุมการขับนำสวิตช์</u> ทำหน้าที่สลับตัวสวิตช์ที่จะนำกระแสตลอดคาบภายในกลุ่มสวิตช์ที่นำกระแสโดยมีการสลับกันทุกคาบของการทำงานและทำหน้าที่ควบคุมการขับนำสวิตช์ วงจรที่ทำหน้าที่ดังกล่าวแสดงอยู่ใน block no.2 และ block no.3 รวมทั้ง T-flipflop ที่ใช้เป็นวงจรหาร 2 (U9A) ในรูปที่

4.3 การเลือกกลุ่มของสวิตช์ที่จะนำกระแสจะถูกควบคุมโดยสัญญาณจากวงจรหน่วงเวลาการเปลี่ยนกลุ่มสวิตช์ที่นำกระแส เมื่อสัญญาณ CURRENT COMMAND POLARITY มีค่าเป็น 1 ทำให้สัญญาณออกของ U6C และ U6D มีค่าเป็น 1 และ 0 ตามลำดับ ลักษณะของสัญญาณดังกล่าวทำให้วงจรใน block no.2 และ block no.3 ถูก enable และ disable ตามลำดับ นั่นคือ กลุ่มสวิตช์ SA1 และ SB2 ถูกเลือกใช้งาน แต่ถ้าสัญญาณ CURRENT COMMAND POLARITY มีค่าเป็น 0 ทำให้สัญญาณออกของ U6C และ U6D มีค่าเป็น 0 และ 1 ตามลำดับ ทำให้วงจรใน block no.2 และ block no.3 ถูก disable และ enable ตามลำดับ นั่นคือ กลุ่มสวิตช์ SA2 และ SB1 ถูกเลือกใช้งาน

เมื่อพิจารณาการทำงานของวงจรเมื่อสัญญาณ CURRENT COMMAND POLARITY และสัญญาณ PROTECTION มีค่าเป็น 1 และถ้าขา 15 ของ U9B มีค่าเป็น 1 จะทำให้สัญญาณ SA1, SB2 เป็น 1 ทำให้สวิตช์ SA1, SB2 นำกระแสพร้อมกัน ในขณะเดียวกันสัญญาณที่ขา 1 ของ U9A ที่ต่อเป็นฟลิปฟลอปแบบที U9A จะมีค่าเป็น 1 หรือ 0 พร้อมกับสัญญาณขา 15 ของ U9B ถ้าให้เริ่มเป็น 1 พร้อมกับขา 15 ของ U9B ก่อน เมื่อขา 15 ของ U9B เป็น 0 เนื่องจากสัญญาณ R (ขา 12) เป็น 1 แต่ขา 1 ของ U9A จะยังคงเป็น 1 อยู่ ทำให้สัญญาณ SA1 ยังคงเป็น 1 แต่ SB2 จะเป็น 0 นั่นคือ ขณะนี้สวิตช์ SA1 จะเป็นสวิตช์ที่นำกระแสตลอดคาบแล้วสวิตช์ SB2 จะหยุดนำกระแส จนกระทั่งเริ่มคาบการทำงานใหม่ขา 15 ของ U9B เป็น 1 ขา 1 ของ U9A ก็จะเป็น 0 SA1, SB2 ก็เป็น 1 พร้อมกันใหม่ เมื่อขา 15 ของ U9B มีค่าเป็น 0 ขา 1 ของ U9A ก็ยังคงมีค่าเป็น 0 ครั้งนี้ SB2 จะเป็น 1 แต่ SA1 จะเป็น 0 นั่นคือ สวิตช์ SB2 จะเป็นสวิตช์ที่นำกระแสตลอดคาบแทน แต่สวิตช์ SA1 จะหยุดนำกระแส จากนั้นก็กลับไปเริ่มต้นใหม่ สลับกันเช่นนี้เรื่อยไป จะเห็นได้ว่า SA1 และ SB2 มีการนำกระแสสลับกันในช่วงเวลาที่ขา 15 ของ U9B มีค่าเป็น 0 ก็คือช่วงเวลา (1-D).Ts ตามต้องการได้ การทำงานของวงจรเมื่อสัญญาณ CURRENT COMMAND POLARITY มีค่าเป็น 0 จะมีลักษณะการทำงาน เมื่อต้องการเฉลี่ยกำลังสูญเสียในสวิตช์และหยุดนำกระแสของสวิตช์เช่นเดียวกับกรณี CURRENT COMMAND POLARITY มีค่าเป็น 1 สำหรับกรณีที่ต้องการให้สวิตช์หยุดนำกระแสทุกตัว เช่น เมื่อต้องการเปลี่ยนรูปแบบการทำงานเป็นแบบ bipolar หรือ เมื่อวงจรป้องกันของแหล่งจ่ายไฟตรงกำลังทำงานจะทำได้โดยทำให้สัญญาณ

PROTECTION มีค่าเป็น 0 สัญญาณ PROTECTION จะเป็นสัญญาณที่ได้จากการดำเนินการทางตรรกแบบ AND ระหว่างสัญญาณ PRO จากวงจรป้องกันของแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคกำลังและสัญญาณ MODE จากวงจรกำเนิดสัญญาณเลือกลำดับการทำงานของสวิตช์

4.2.2 <u>วงจรเปรียบเทียบกระแส</u> ทำหน้าที่เปรียบเทียบค่าอ้างอิงของกระแสในตัวเหนี่ยวนำกับกระแสในตัวเหนี่ยวนำที่วัดได้ และให้สัญญาณออกที่จะนำไปควบคุมการหยุดนำกระแสของสวิตช์ ประกอบด้วยวงจรเปรียบเทียบ 3 วงจร คือ U7A,U7B และ U8A ดังแสดงอยู่ทางด้านขวาล่างของรูปที่ 4.4 ตัวเปรียบเทียบที่ใช้เป็นวงจรประมวลเบอร์ LM319 ซึ่งภายในวงจรประมวลแต่ละตัวประกอบด้วยวงจรเปรียบเทียบ 2 ชุด U7A เป็นวงจรเปรียบเทียบ เมื่อสัญญาณคำสั่งกระแสจากวงจรบวกและวงจรจำกัดค่ากระแสในตัวเหนี่ยวนำเป็นลบ โดยให้สัญญาณออกชื่อว่า NEGATIVE CURRENT ERROR สัญญาณนี้จะมีค่าเป็น 1 คือ มีแรงดันเท่ากับ 12 โวลต์ เมื่อขนาดสัญญาณกระแสในตัวเหนี่ยวนำจากอุปกรณ์วัดกระแสในตัวเหนี่ยวนำมีค่ามากกว่าขนาดสัญญาณคำสั่งกระแสจากวงจรบวกและวงจรจำกัดค่ากระแสในตัวเหนี่ยวนำ โดยที่ทั้งสัญญาณอ้างอิงของกระแสในตัวเหนี่ยวนำและกระแสในตัวเหนี่ยวนำที่วัดได้ต่างมีทิศทางเป็นลบ เพื่อให้สัญญาณออกเป็นไปตามเงื่อนไขดังกล่าวจึงทำการต่อสัญญาณกระแสในตัวเหนียวนำจากอุปกรณ์วัดกระแสในตัวเหนี่ยวนำเข้ากับขั้วลบของ U7A ส่วนสัญญาณออกจากวงจรบวกและวงจรจำกัดค่ากระแสในตัวเหนี่ยวนำ ต้องต่อเข้ากับขั้วบวกของ U7A ในกรณีที่ค่าอ้างอิงของกระแสในตัวเหนี่ยวนำมีค่าเป็นบวกจะใช้วงจรเปรียบเทียบ U7B ซึ่งจะให้สัญญาณออกเป็น POSITIVE CURRENT ERROR ซึ่งจะมีค่าเป็น 1 คือ มีแรงดันออกเท่ากับ 12 โวลต์ เมื่อขนาดของกระแสในตัวเหนี่ยวนำจากอุปกรณ์วัดมีค่ามากกว่าค่าอ้างอิงของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ โดยที่สัญญาณทั้งสองมีทิศทางเป็นบวกจึงทำการต่อสัญญาณกระแสในตัวเหนี่ยวนำจากอุปกรณ์วัดกระแสในตัวเหนี่ยวนำเข้ากับขั้วบวกของ U7B และต่อสัญญาณออกจากวงจรบวกและวงจรจำกัดค่ากระแสในตัวเหนี่ยวนำเข้ากับขั้วลบของ U7B สำหรับ U8A เป็นวงจรบอกขั้วของสัญญาณคำสั่งกระแสในตัวเหนี่ยวนำ จึงให้ชื่อสัญญาณออกนี้ว่า CURRENT COMMAND POLARITY เนื่องจากต้องการให้สัญญาณ CURRENT COMMAND POLARITY มีค่าเป็น 1 เมื่อกระแสในตัวเหนี่ยวนำมีขั้วเป็นบวก และสัญญาณ CURRENT COMMAND POLARITY มีค่าเป็น 0 เมื่อกระแส



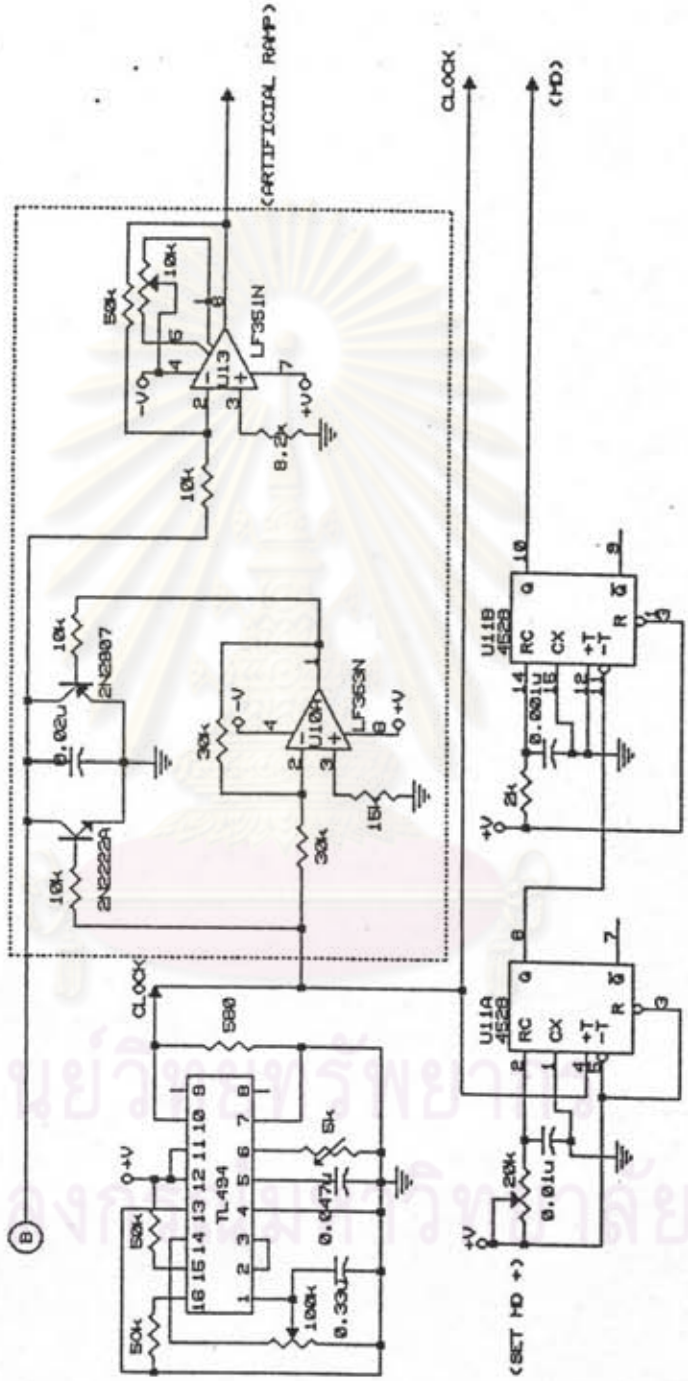
รูปที่ 4.4 วงจรควบคุมส่วนหน้า

ในตัวเหนี่ยวนำมีขั้วเป็นลบ ดังนั้นจึงต้องต่อสัญญาณคำสั่งกระแสจากวงจรบวกและจำกัดกระแสในตัวเหนี่ยวนำเข้ากับขั้วบวกของ U8A ส่วนขั้วลบของ U8A จะต่อเข้ากับกราวด์ของระบบควบคุม

4.2.3 <u>วงจรบวกและวงจรจำกัดค่ากระแสในตัวเหนี่ยวนำ</u> จะทำหน้าที่บวกสัญญาณฟันเลื่อยชดเชยแบบพอดีกับสัญญาณควบคุมกระแสจากวงจรเปรียบเทียบและคุมค่าที่ทำให้มีขั้วตรงข้ามกัน การบวกนี้ทำได้โดยนำสัญญาณทั้งสองต่อเข้ากับ วงจรบวกแบบกลับเฟสที่มีอัตราขยายเท่ากับ 1 ซึ่งใช้วงจรประมวลเบอร์ LF351(U5) และตัวต้านทานต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยให้ชื่อสัญญาณฟันเลื่อยชดเชยแบบพอดีเป็น ARTIFICIAL RAMP ซึ่งสร้างจากวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อยชดเชยแบบพอดีดังจะกล่าวในหัวข้อถัดไป ส่วนสัญญาณควบคุมกระแสได้มาจากวงจรเปรียบเทียบและคุมค่ากระแสออก (U3A, U3B) ในรูปที่ 4.4)หรือจากวงจรเปรียบเทียบและคุมค่าแรงดันออก (U2A, U2B ในรูปที่ 4.4) ก็ขึ้นกับความต้องการของผู้ใช้ว่าต้องการให้วงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงทำงานในภาคกระแสหรือภาคแรงดัน โดยการปรับที่สวิตช์ SM การจำกัดค่ากระแสในตัวเหนี่ยวนำทำได้โดยอาศัยการอิ่มตัวของออปแอมป์ประกอบกับวงจรแบ่งแรงดันที่ใช้ตัวต้านทาน 8.2 และ 10 กิโลโอห์ม กล่าวคือเมื่อออมแอมป์ U5 อิ่มตัวและแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน 10 กิโลโอห์ม จะมีค่า 6 โวลต์ ซึ่งสมมูลกับกระแสในตัวเหนี่ยวนำ 20 แอมแปร์ ดังนั้นกระแสสูงสุดในตัวเหนี่ยวนำจะถูกว่าจำกัดไว้ที่ 20 แอมแปร์ เมื่อจุดกลางของตัวต้านทานที่ปรับค่าได้เลื่อนไปอยู่ในตำแหน่งสูงสุด ในกรณีที่ต้องการจำกัดค่ากระแสในตัวเหนี่ยวนำให้มีค่าต่ำกว่า 20 แอมแปร์ จะสามารถทำได้โดยการเลื่อนจุดกลางของตัวต้านทาน 10 กิโลโอห์ม ที่ปรับค่าได้ไปสู่ตำแหน่งที่ต่ำลงไป

4.2.4 <u>วงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อยชดเชยแบบพอดี</u> ทำหน้าที่สร้างสัญญาณฟันเลื่อยที่มีความลาดชันเท่ากับความลาดชันของการลดลงของสัญญาณกระแสในตัวเหนี่ยวนำจากอุปกรณ์วัดกระแสในตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งขึ้นกับแรงดันออกของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรง เนื่องจากสัญญาณฟันเลื่อยที่สร้างขึ้นจะต้องมีความลาดชันขึ้นกับ แรงดันออกของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรง และมีความถี่เท่ากับ 20 กิโลเฮิรตซ์ ดังนั้นจึงใช้แรงดันออกในการควบคุมความลาดชันซึ่งทำได้โดยการใช้แรงดันออกของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงในการควบคุมแหล่งกำเนิดกระแส แล้วให้ตัวเก็บประจุเป็นตัวอินทิเกรตกระแส ทำให้แรงดันที่

ตกคร่อมตัวเก็บประจุดังกล่าวมีการเพิ่มค่าขึ้นเป็นเส้นตรง เนื่องจากกระแสมีค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับแรงดันออกของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรง โดยความลาดชันของการเพิ่มขึ้นของแรงดันจะถูกกำหนดด้วยขนาดแรงดันออก หลังจากเวลาประมาณ 48 ไมโครวินาที (คาบเวลาลบด้วยความกว้างของสัญญาณนาฬิกา) ก็จะทำการคายประจุในตัวเก็บประจุจนมีค่าเป็นศูนย์ โดยการลัดวงจรตัวเก็บประจุเป็นเวลา 2 ไมโครวินาที หลังจากนี้ก็เริ่มให้ตัวเก็บประจุ อินทิเกรตกระแสใหม่เช่นนี้เรื่อยไปก็จะได้สัญญาณฟันเลื่อยที่มีความลาดชันขึ้นกับแรงดันออกของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรง วงจรที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันออกของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงเป็นแหล่งกำเนิดกระแสได้แก่ วงจรแปลงผันแรงดันเป็นตัวกำเนิดกระแสแบบไม่กลับขั้ว ที่ใช้วงจรประมวล LF 353 (U10B) กับตัวต้านทานต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ทางด้านซ้ายมือ แรงดันออกของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงจะถูกลดทอนลงด้วยตัวต้านทานปรับค่าได้ขนาด 200 กิโลโอห์มที่อยู่ทางซ้ายมือของ U10B ในรูปที่ 4.4 ดังนั้นความลาดชันของสัญญาณฟันเลื่อยที่ได้ยังขึ้นกับการปรับค่าของตัวต้านทานปรับค่าได้ขนาด 200 กิโลโอห์มนี้ด้วย จากกระแสที่ได้จาก U10B จะถูกป้อนแก่ตัวเก็บประจุ ขนาด 0.02 ไมโครฟารัด ในกรอบสี่เหลี่ยมเส้นประในรูปที่ 4.5 ผ่านจุด B ในขณะที่แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุเป็นบวกซึ่งเป็นกรณีที่แรงดันออกของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงเป็นบวกทรานซิสเตอร์ npn เบอร์ 2N2222A จะทำหน้าที่ในการคายประจุออกจากตัวเก็บประจุ เมื่อถูกขับนำให้นำกระแสโดยสัญญาณจากวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาที่ต่อเข้ากับขาเบสของทรานซิสเตอร์ npnเมื่อถึงคาบเวลา แต่ถ้าแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุเป็นลบ เนื่องจากแรงดันออกของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงมีค่าเป็นลบ การคายประจุจนเป็นศูนย์จะทำได้โดยทรานซิสเตอร์ pnp เนื่องจากสัญญาณนาฬิกามีขั้วเป็นบวก เพื่อทำให้ทรานซิสเตอร์ pnp นำกระแสได้จึงต้องกลับขั้วสัญญาณนาฬิกาด้วยวงจรขยายกลับเฟสที่มีอัตราขยายเท่ากับ 1 โดยใช้วงจรประมวล LF353 (U10B) และตัวต้านทาน สัญญาณฟันเลื่อยจะถูกขยายและกลับขั้วด้วยวงจรขยายกลับเฟสที่มีอัตราขยายเท่ากับ 5 โดยใช้วงจรประมวล LF351 (U13) และตัวต้านทาน สัญญาณฟันเลื่อยด้านออกของ U13 (ARTIFICIAL RAMP) นี้สามารถปรับความลาดชันให้ชดเชยแบบพอดีโดยตัวต้านทานปรับค่าได้ค่า 200 กิโลโอห์ม และแรงดันออกของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรง



รูปที่ 4.5 วงจรความคมส่วนที่สอง

4.2.5 วงจรสร้างสัญญาณนาฬิกา มีหน้าที่สร้างสัญญาณนาฬิกาเพื่อกำหนดความถี่การทำงานของสวิตช์ การสร้างสัญญาณนาฬิกาทำได้โดยการต่อวงจรประมวล TL494 ดังในรูปที่ 4.5 ทางด้านซ้ายบน ความถี่ของสัญญาณนาฬิกาถูกกำหนดด้วยตัวต้านทานปรับค่าได้ขนาด 4.7 กิโลโอห์มและตัวเก็บประจุ 0.047 ไมโครฟารัด ซึ่งถูกปรับให้มีความถี่เท่ากับ 20 กิโลเฮิรตซ์ ส่วนความกว้างพัลส์ของสัญญาณนาฬิกาจะถูกควบคุมโดยแรงดันที่ขา 1 และได้ทำการปรับให้ความกว้างพัลส์ของสัญญาณนาฬิกากว้าง 2 ไมโครวินาที สัญญาณนาฬิกาจะได้จากขา 10 และให้ชื่อว่า CLOCK

4.2.6 วงจรกำหนดวัฏจักรงานสูงสุด ทำหน้าที่จำกัดค่าวัฏจักรงานสูงสุดไว้ที่ 0.95 โดยการสร้างพัลส์ที่ล้าหลังพัลส์ของสัญญาณนาฬิกาเป็นเวลา 47.5 ไมโครวินาที เพื่อใช้ในการควบคุมการหยุดนำกระแสของสวิตช์ในกรณีที่วงจรเปรียบเทียบกระแสไม่สามารถควบคุมให้สวิตช์หยุดนำกระแสภายใน 1 คาบของการทำงาน วงจรกำเนิดพัลส์ ใช้วงจรประมวลเบอร์ 4528 ซึ่งเป็นวงจรเอกเสถียร (monostable) (U11A, U11B) ต่อเป็นวงจรดังแสดงในรูปที่ 4.5 วงจรกำหนดวัฏจักรงานสูงสุดมีสัญญาณจากวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาเป็นสัญญาณเข้า โดยต่อเข้ากับขาเข้าของ U11A ซึ่งจะให้สัญญาณออก Q ที่ขา 6 เป็น 1 ที่ขาขึ้นของสัญญาณนาฬิกาโดยจะมีสถานะเป็น 1 อยู่เป็นเวลา 47.5 ไมโครวินาที หลังจากเวลาที่พัลส์ของสัญญาณนาฬิกามีค่าเปลี่ยนจาก 0 เป็น 1 สัญญาณออกของ U11A จะต่อเข้ากับขาเข้าของวงจร U11B เพื่อให้วงจรเป็นวงจร monostable ซึ่งเริ่มทำงานที่ขอบขาลงของสัญญาณเข้า เมื่อสัญญาณที่ขา 6 ของ U11A มีค่าเปลี่ยนจาก 1 เป็น 0 จะทำให้สัญญาณออก Q ของ U11B ที่ขา 10 มีค่าเป็น 1 เป็นเวลานาน 1 ไมโครวินาที สัญญาณออกของ U11B ก็คือพัลส์ที่ล้าหลังพัลส์ของสัญญาณนาฬิกาเป็นเวลา 47.5 ไมโครวินาที ให้ชื่อสัญญาณว่า MD ซึ่งทำหน้าที่กำหนดค่าสูงสุดของวัฏจักรงานของสวิตช์

4.2.7 วงจรกำเนิดสัญญาณเลือกลำดับการทำงานของสวิตช์ ทำหน้าที่สร้างสัญญาณเพื่อเลือกลำดับการทำงานของสวิตช์ให้กับวงจร โดยในภาวะปกติซึ่งต้องการให้วงจรแปลงผันไฟตรงไฟตรงมีลำดับการทำงานของสวิตช์เป็นแบบขั้วเดียวจำกัด (limited unipolar) สัญญาณออกของวงจรกำเนิดสัญญาณเลือกลำดับการทำงานของสวิตช์จะมีสถานะเป็น 1 แต่ในกรณีที่กระแสเกินพิกัดสูงสุดที่กำหนดซึ่งอาจจะเกิดจากการลัดวงจรหรือเกิดจากการกลับทิศทางการ

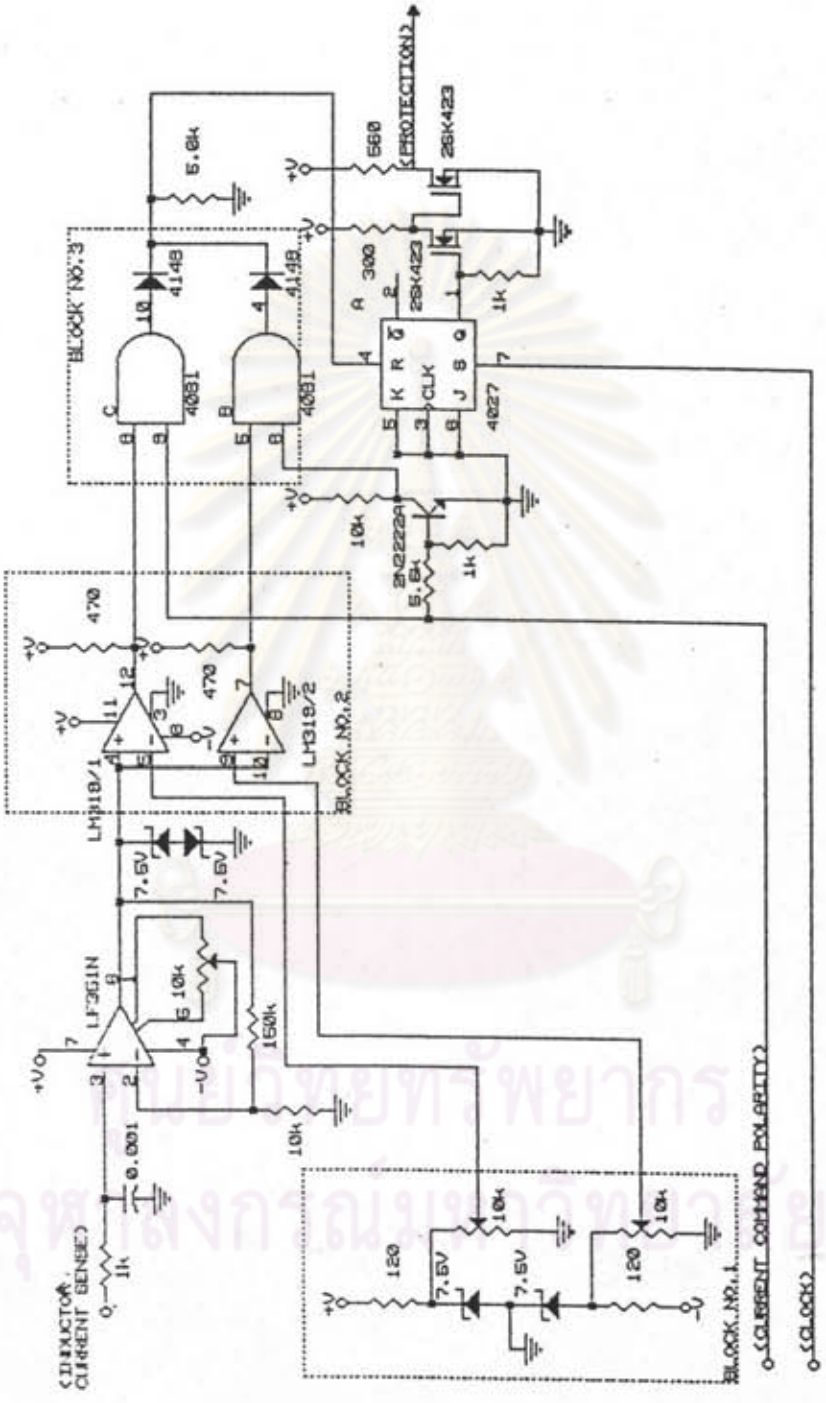
หมุนของมอเตอร์ สัญญาณออกของวงจรจะเปลี่ยนสถานะเป็น 0 เพื่อควบคุมให้วงจรตรรกเปลี่ยนลำดับการทำงานของสวิตช์เป็นแบบ 2 ขั้ว (Bipolar) ซึ่งจะทำให้สามารถจำกัดกระแสออกได้ เนื่องจากสัญญาณออกของวงจรดังกล่าวทำหน้าที่กำหนดลำดับการทำงานของสวิตช์ ดังนั้น จะเรียกสัญญาณดังกล่าวว่าเป็นสัญญาณ MODE การสร้างสัญญาณ MODE ทำได้โดยนำค่ากระแสในตัวเหนี่ยวนำจากอุปกรณ์วัดกระแสในตัวเหนี่ยวนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณตั้งค่ากระแสจำกัดจากวงจรตั้งค่ากระแสจำกัดตัวดังแสดงใน block no.1 ของรูปที่ 4.6 ซึ่งเป็นแรงดันไฟตรงที่ใช้วิธีสร้างเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.4 การเปรียบเทียบจำเป็นต้องมีตัวเปรียบเทียบทั้งกรณีที่กระแสในตัวเหนี่ยวนำมีค่าเป็นบวกและลบ ดังนั้นจึงต้องมีวงจรเปรียบเทียบ 2 วงจร ดังแสดงใน block no.2 ของรูปที่ 4.6 การเลือกสัญญาณออกระหว่าง วงจรเปรียบเทียบสำหรับกรณีที่กระแสในตัวเหนี่ยวนำเป็นบวกหรือลบนั้น ทำโดยการใช้สัญญาณบอกขั้วของสัญญาณคำสั่งกระแสในตัวเหนี่ยวนำโดยมีวงจรดังแสดงใน block no.3 สัญญาณออกของวงจรเลือกผลการเปรียบเทียบจะต้องต่อเข้ากับขา RESET ของ S-R flip flop เพื่อresetให้สัญญาณออกของ S-R flip flop ซึ่งเป็นสัญญาณออกของวงจรกำเนิดสัญญาณเลือกลำดับการทำงานของสวิตช์เป็น 0 เมื่อสัญญาณออกของวงจรเปรียบเทียบกระแสที่ถูกเลือกมีค่าเป็น 1 ในกรณีที่กระแสในตัวเหนี่ยวนำมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของสัญญาณตั้งค่ากระแสจำกัดจากวงจรตั้งค่ากระแสจำกัดซึ่งในกรณีดังกล่าวจะทำให้วงจรตรรกเลือกลำดับการทำงานเป็นแบบ 2 ขั้ว (bipolar) เพื่อจำกัดกระแสออก

4.3 วงจรเปรียบเทียบและคุมค่า

วงจรเปรียบเทียบและคุมค่าจะทำหน้าที่เปรียบเทียบตัวแปรด้านออกกับค่าตั้งและควบคุมให้ตัวแปรด้านออกมีค่าตามที่กำหนดด้วยค่าตั้งของตัวแปรด้านออกซึ่งอาจจะเป็นกระแสหรือแรงดันออกก็ได้ ขึ้นอยู่กับว่าจะต้องการควบคุมให้วงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงทำงานในภาคกระแสหรือภาคแรงดัน ดังนั้นวงจรเปรียบเทียบและคุมค่าอาจจะเป็นวงจรเปรียบเทียบและคุมค่ากระแสหรือแรงดันออกก็ได้

4.3.1 วงจรเปรียบเทียบและคุมค่าแรงดันออก

วงจรเปรียบเทียบ



รูปที่ 4.6 วงจรกำเนิดสัญญาณเลื่อยลำดับการทำงานของสวิตช์

และคุมค่าแรงดันออกจะทำหน้าที่คงค่าแรงดันออกให้เท่ากับค่าที่กำหนดโดยค่าตั้ง โดยการจัดแจงให้สัญญาณออกของวงจรเปรียบเทียบและคุมค่าแรงดันออกซึ่งเป็นค่าอ้างอิงของกระแสในตัวเหนี่ยวนำมีค่าที่เหมาะสมที่จะทำให้ สัญญาณตรวจจับแรงดันออกจากวงจรจัดแจงสัญญาณป้อนกลับแรงดันออกมีค่าเท่ากับค่าตั้งของวงจรตั้งค่าโดยที่ทั้งสองสัญญาณจะมีขั้วที่ต่างกัน วงจรเปรียบเทียบและคุมค่าแรงดันออกใช้วงจรประมวล LF351(U3A,U3B) และตัวต้านทานต่อกันเป็นวงจรดังแสดงในรูปที่ 4.4 จากวงจรคุมค่าแรงดันในรูป 4.4ฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรคุมค่าแรงดัน (gv) จะมีค่าตามสมการ 4.1

$$gv = 48 \times \frac{(sx0.47 + 1)}{sx0.47} \times \frac{(sx.0008+1)}{(sx.017+1)} \qquad (4.1)$$

จะเห็นได้ว่าฟังก์ชันโอนย้าย gv ของวงจรคุมค่าแรงดันออกจะมีอัตราขยาย,ตำแหน่งของขั้วและศูนย์ตามที่ออกแบบไว้ในบทที่ 3 โดยมีอัตราขยายสำหรับสัญญาณไฟตรงสูงมาก และมีอัตราขยายสำหรับสัญญาณความที่สูงค่อนข้างต่ำคือประมาณ 2.26

4.3.2 <u>วงจรเปรียบเทียบและคุมค่ากระแสออก</u> วงจรเปรียบเทียบและคุมค่ากระแสออก จะทำหน้าที่ควบคุมกระแสออกให้มีค่าเท่ากับค่าที่กำหนดโดยวงจรตั้งค่า โดยการจัดแจงให้สัญญาณออกของวงจรเปรียบเทียบและคุมค่ากระแสออกซึ่งเป็นสัญญาณควบคุมกระแสในตัวเหนี่ยวนำให้มีค่าที่เหมาะสมที่จะทำให้สัญญาณตรวจจับกระแสออกจากวงจรจัดแจงสัญญาณป้อนกลับกระแสออกมีค่าเท่ากับสัญญาณตั้งค่าจากวงจรตั้งค่า โดยที่ทั้งสองสัญญาณจะมีขั้วที่ต่างกันวงจรเปรียบเทียบและคุมค่ากระแสออกใช้วงจรประมวล LF351 (U2A,U2B) และตัวต้านทานต่อกันเป็นวงจร ดังแสดงในรูปที่ 4.4 จากวงจรคุมค่ากระแสดังแสดงในรูป 4.4 ฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรคุมค่ากระแส gi จะมีค่าตามสมการ (4.2)

$$gi = 30.5 \times \frac{(0.0053xs + 1)}{0.0053xs} \times \frac{(0.22xs + 1)}{(3.9xs + 1)} \qquad (4.2)$$

จะเห็นได้ว่าฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรคงค่ากระแสออกมีอัตราขยายตำแหน่งของขั้วและศูนย์ ตามที่ออกแบบให้ในบทที่ 3 โดยมีอัตราขยายสำหรับสัญญาณไฟตรงสูงมากแต่จะมี อัตราขยายสำหรับสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงต่ำถึงประมาณ 1.7 เท่านั้น

4.4 วงจรตั้งค่า

ทำหน้าที่สร้างสัญญาณตั้งค่ากระแสหรือแรงดันออก ซึ่งจะอยู่ในรูปของแรงดันไฟตรงค่าระหว่าง -10 ถึง +10โวลต์ หรือ อยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีลักษณะรูปคลื่นต่างๆ โดยมีค่าสูงสุด +/- 10 โวลต์ สำหรับสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับนี้จะเป็นสัญญาณที่ป้อนจากแหล่งกำเนิดสัญญาณภายนอก วงจรตั้งค่านี้ทำได้โดยอุปกรณ์ในกรอบเส้นประทางด้านซ้ายมือของรูปที่ 4.4 สวิตช์ sw_1 เป็นสวิตช์ที่ใช้สำหรับในการเลือกว่าจะรับสัญญาณตั้งค่าจากภายนอกหรือภายในวงจรขยายเชอร์โวกระแสตรง การสร้างสัญญาณตั้งค่าภายในวงจรขยายเชอร์โวกระแสตรงจะเป็นแรงดันไฟตรงที่เปลี่ยนค่าได้ระหว่าง -10 ถึง +10 โวลต์ โดยมีแรงดัน + 12 โวลต์ เป็นไฟเลี้ยงวงจร ทำการคงค่าแรงดันไว้ที่ 10 โวลต์ โดยซีเนอร์ไดโอด 10 โวลต์ และจำกัดกระแสด้วยความต้านทาน 120 โอห์มทั้งบวกและลบ ส่วนการเปลี่ยนค่าสัญญาณตั้งค่าทำได้โดยการปรับตำแหน่งของจุดกลางของตัวต้านทานปรับค่าได้ที่มีค่าตัวต้านทาน 10 กิโลโอห์ม

ส่วนตัวเปรียบเทียบ 2 ตัว U9A, U9B ด้านบนขวาของรูปที่ 4.4 มีไว้สำหรับแสดงผลว่าวงจรทำงานในช่วงแรงดันออกเป็นบวกหรือลบ

4.5 วงจรจัดแจงสัญญาณป้อนกลับ

ทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสออกหรือแรงดันออกให้เป็นแรงดันที่แทนค่าของกระแสออกหรือแรงดันออก

4.5.1 วงจรจัดแจงสัญญาณป้อนกลับกระแสออก ทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสออกให้เป็นแรงดันที่แทนค่าของกระแสออกโดยการใช้ตัวต้านทาน R1 ดังแสดงในรูปที่ 4.1 จากการวางตำแหน่งดังกล่าว เมื่อกระแสออกมีขั้วลบหรือบวกแรงดันตกคร่อม R2 ก็เป็นลบหรือบวก ตามลำดับเช่นกัน เพื่อทำให้ขนาด

ของสัญญาณมีความเหมาะสม จึงทำการขยายสัญญาณแรงดันตกคร่อม R2 ด้วยวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส ที่มีอัตราขยายเท่ากับ 25 วงจรขยายไม่กลับเฟสประกอบด้วย วงจรประมวล LF351 (U1) และตัวต้านทานต่าง ๆ ดังแสดงทางด้านซ้ายบนในรูปที่ 4.4 แรงดันออกของ U1 จะแทนกระแสออกที่ผ่านอุปกรณ์วัดกระแสออก เนื่องจากวงจรขยายเป็นวงจรขยายแบบไม่กลับเฟสดังนั้นแรงดันออกของ U1 จะมีขั้วเหมือนกับกระแสออก

4.5.2 <u>วงจรจัดแจงสัญญาณป้อนกลับแรงดันออก</u> ทำหน้าที่ลดขนาดแรงดันออกให้มีค่าลดลงประมาณ 10 เท่า โดยการใช้วงจรแบ่งแรงดันที่ใช้ตัวต้านทาน 470 กิโลโอห์ม และ 50 กิโลโอห์ม ดังแสดงอยู่ทางด้านซ้ายในรูปที่ 4.4 แรงดันออกที่ถูกลดขนาดลงจะถูกใช้เป็นแรงดันที่แทนค่าแรงดันออกเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับแรงดันตั้งค่า

4.6 <u>อุปกรณ์วัดกระแส</u>

ทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสให้เป็นแรงดันที่แทนค่าของกระแสโดยการใช้ตัวต้านทาน R1 ดังแสดงในรูปที่ 4.1 จากการวางตำแหน่งดังกล่าว เมื่อกระแสในตัวเหนี่ยวนำมีขั้วลบหรือบวกแรงดันตกคร่อม R1 ก็เป็นลบหรือบวก ตามลำดับเช่นกัน เพื่อให้ขนาดของสัญญาณมีความเหมาะสมจึงทำการขยายสัญญาณแรงดันตกคร่อม R1 ด้วยวงจรขยายแบบไม่กลับเฟสที่มีอัตราขยายเท่ากับ 15 วงจรขยายไม่กลับเฟสประกอบด้วยวงจรประมวล LF351 (U4) กับตัวต้านทานต่าง ๆ ดังแสดงอยู่ทางด้านซ้ายล่างในรูปที่ 4.4 แรงดันออกของ U4 จะแทนกระแสในตัวเหนี่ยวนำที่ผ่านอุปกรณ์วัดกระแสในตัวเหนี่ยวนำ เนื่องจากวงจรขยายเป็นวงจรขยายแบบไม่กลับเฟสดังนั้นแรงดันออกของ U4 จะมีขั้วเหมือนกับกระแสในตัวเหนี่ยวนำ

4.7 <u>แหล่งจ่ายไฟตรง</u>

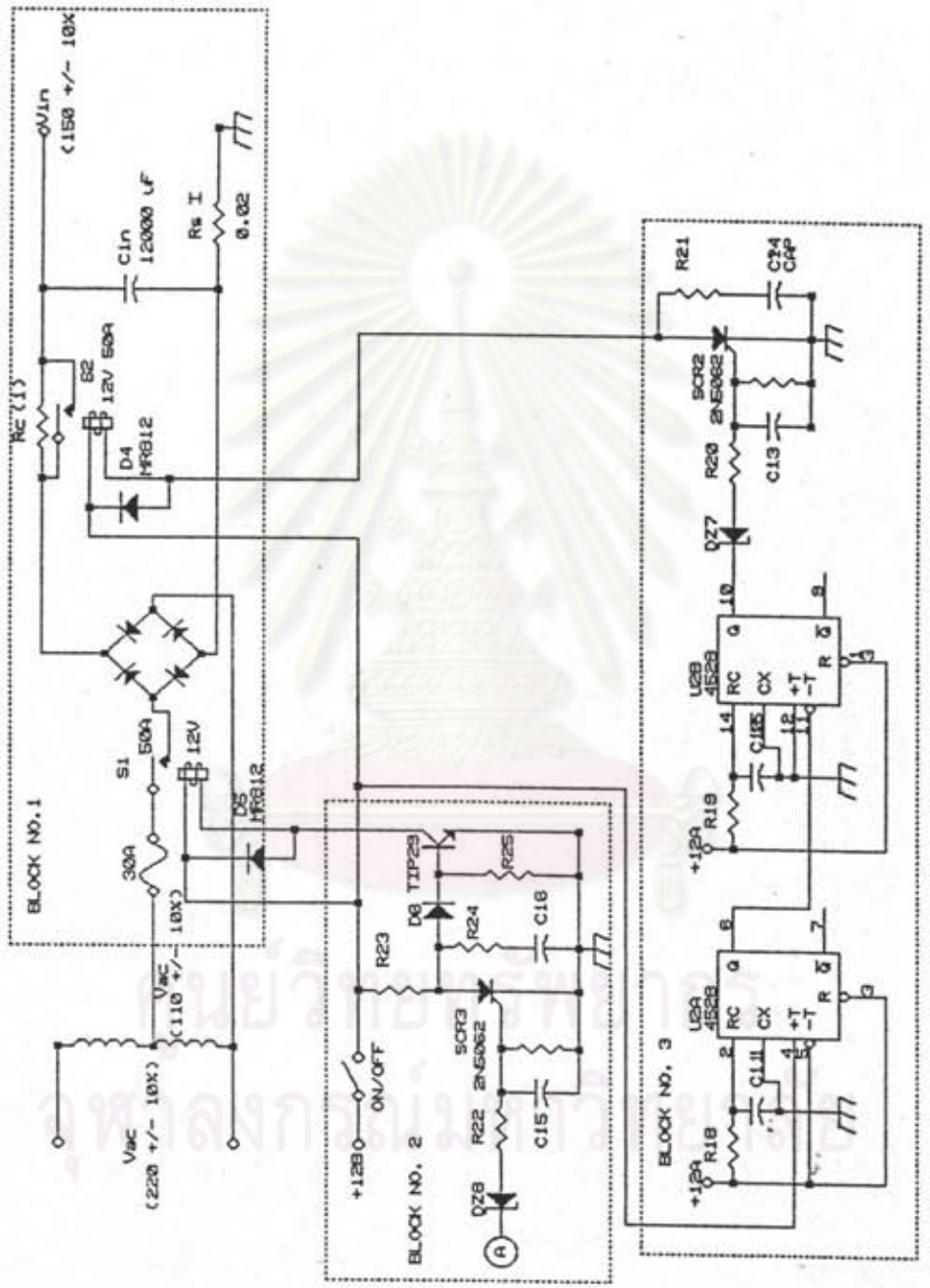
ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้าสลับ 220 โวลต์ ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยแบ่งเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ แหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคกำลังและแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคควบคุม แต่ละส่วนจะมีรายละเอียดของวงจรดังต่อไปนี้

4.7.1 <u>แหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคกำลัง</u> ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 220 โวลต์ ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อจ่ายให้กับภาคกำลังของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง มีส่วนประกอบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.7, 4.8, 4.9 โดยแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ด้วยกันคือ

- หม้อแปลงไฟฟ้า
- วงจรเรียงกระแส
- วงจรกรอง
- วงจรป้องกัน และวงจรควบคุมการปิดเปิด

วงจรใน block no.1 ของรูปที่ 4.7 แสดงการต่อหม้อแปลงไฟฟ้า, วงจรเรียงกระแส (ไดโอดที่ต่อกันแบบบริดจ์), วงจรกรอง (ตัวเก็บประจุ)และตัวต้านทาน R_c ซึ่งมีไว้สำหรับลดกระแสไหลเข้าตัวเก็บประจุในตอนเริ่มประจุมิให้มีค่ามากเกินไป ตัวต้านทานนี้จะถูกลัดวงจรโดยหน้าสัมผัส S_2 เพื่อลดกำลังสูญเสีย หน้าสัมผัส S_1 ที่ถูกควบคุมโดยวงจรควบคุมการปิดเปิด จะใช้ในการตัดต่อไฟสลับที่ต่อเข้าวงจรเรียงกระแส ในการประกอบวงจรจำเป็นต้องทราบขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้า, ไดโอดที่นำมาต่อเป็นวงจรเรียงกระแส ตัวเก็บประจุ C ที่นำมาเป็นวงจรกรอง ขนาดของส่วนประกอบดังกล่าวจะขึ้นกับขนาดของแรงดันออกและกระแสออกของแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคกำลังซึ่งขึ้นกับวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง

4.7.1.1 <u>การคำนวณหาขนาดแรงดันและกระแสออกของแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคกำลัง</u> ตามข้อกำหนดของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงที่ให้มีแรงดันออกสูงสุดเท่ากับ 100 โวลต์ แต่เมื่อคำนึงถึง voltage regulation ของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง 15% จึงต้องใช้แรงดันออกสูงสุด เท่ากับ 115 โวลต์ ถ้ากำหนดให้วัฏจักรงานของวงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟตรง มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.95 แรงดันเข้าของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง จึงควรเป็นประมาณเท่ากับ 121 โวลต์ และเมื่อคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้าอีก 10 % จึงเลือกแรงดันออกของแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคกำลังให้มีค่าประมาณเท่ากับ 135 โวลต์ การประมาณค่ากระแสออกของแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคกำลัง สามารถทำได้การประมาณขนาดกำลังออกของแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคกำลัง ซึ่งมีค่าประมาณเท่ากับกำลังออกของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง หารด้วยประสิทธิภาพของ



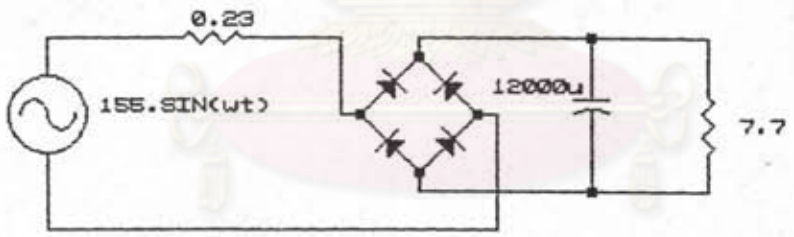
รูปที่ 4.7 วงจรกำลังของแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคกำลังและวงจรควบคุมการปิดเปิด

วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง จากข้อกำหนดให้กำลังออกของวงจรขยายเซอร์โว กระแสตรงมีกำลังสูงสุดเท่ากับ 2 กิโลวัตต์ ดังนั้นกำลังออกของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงต้องมีค่าสูงสุด เท่ากับ 2 กิโลวัตต์ ถ้าประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง มีค่าประมาณ 85 เปอร์เซนต์ กำลังออกของแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับกำลังควรมีค่าเท่ากับ 2350 วัตต์ และกระแสออกของแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคกำลังควรมีค่าเท่ากับ 17.5 แอมแปร์

4.7.1.2 <u>การออกแบบขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้า, วงจรเรียงกระแส, วงจรกรอง</u> ในการเลือกขนาดของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้า และขนาดของตัวเก็บประจุสำหรับกระแสออก, แรงดันออกและการกระเพื่อมของแรงดันออกที่กำหนด จะต้องทราบค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งในกรณีที่มีหม้อแปลงอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับจะเกิดจากอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงเป็นส่วนใหญ่ เพื่อที่จะหาขนาดของอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง จะต้องทราบขนาดของหม้อแปลงโดยประม าณก่อน การประมาณขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถประมาณได้จาก กำลังงานออกของแหล่งจ่ายไฟตรงภาคกำลัง โดยการใช้ค่าประมาณของอัตราส่วนระหว่างโวลต์แอมแปร์ของหม้อแปลงต่อกำลังออกของไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากับ 1.6 เนื่องจากประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีค่าสูงมาก (มากกว่า 98%) จึงประมาณได้ว่ากำลังออก (วัตต์) ของหม้อแปลงไฟฟ้าเท่ากับ 2350 วัตต์ ดังนั้นหม้อแปลงไฟฟ้าต้องมีขนาดเท่ากับ 3760 โวลต์แอมแปร์ จากขนาดของหม้อแปลงและค่าการคงค่าแรงดันจะสามารถคำนวณหาอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงได้ การลดลงของแรงดันออกของหม้อแปลงเกิดจากแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงเนื่องจากกระแสโหลดของหม้อแปลง สำหรับหม้อแปลงขนาดเล็กโดยทั่วไปแล้วอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงจะเป็นความต้านทานเป็นส่วนใหญ่ดังนั้นเมื่อละเลยตัวเหนี่ยวนำของหม้อแปลงและใช้เฉพาะตัวต้านทานในการคำนวณ สำหรับหม้อแปลงขนาดดังกล่าว การคงค่าแรงดันจะมีค่าประมาณ 3 - 5 เปอร์เซ็นต์ โดยการใช้ค่าการคงค่าแรงดันเท่ากับ 5 เปอร์เซนต์และกระแสออกเท่ากับ 17.5 แอมแปร์ คำนวณหาความต้านทานของหม้อแปลงได้เท่ากับ 0.23 โอห์ม ส่วนโหลดของแหล่งไฟตรงสำหรับภาคกำลังสามารถแทนด้วยตัวต้านทาน R_L ที่มีค่าเท่ากับ 7.7 โอห์ม เมื่อกำหนดค่าประสิทธิผลของแรงดันกระเพื่อมของแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคกำลัง (r_f) มีค่าเท่ากับ 3 % และ อัตราส่วนของ R_s/R_L ซึ่งมีค่าเท่ากับ

0.03 จากกราฟที่เสนอโดย Schade [Motorola, 1982] จะได้ $w.C.R_L$ = 25, V_{DC}/V_M = 0.9 จากค่า $w.C.R_L$ เมื่อตัวต้านทานของโหลดเท่ากับ 7.7 โอห์มและความถี่ที่ใช้เท่ากับ 50 เฮิรตซ์ คำนวณขนาดของตัวเก็บประจุได้เท่ากับ 10900.9 ไมโครฟารัด เมื่อเลือกใช้ตัวเก็บประจุขนาดตัวละ 4000 ไมโครฟารัด ทนแรงดันได้ตัวละ 350 โวลต์ จำนวน 3 ตัวขนานกัน จะให้ค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ 12,000 ไมโครฟารัด

ส่วนแรงดันทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง จะหาได้จากอัตราส่วน V_{ac}/V_m และค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่กำหนดรวมแรงดันแตกคร่อมไดโอดประมาณ 2 โวลต์จะได้ว่าแรงดันด้านทุติยภูมิ 107.5 โวลต์ จึงเลือกใช้แรงดันทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง 110 โวลต์ เมื่อทราบขนาดความต้านทานของโหลด, ขนาดของตัวเก็บประจุ (C), แรงดันทางด้านทุติยภูมิและความต้านทานของหม้อแปลง จะสามารถจำลองการทำงานของวงจรด้วยคอมพิวเตอร์และจากรูปคลื่นของกระแสในหม้อแปลงและกระแสในไดโอด ทำให้สามารถคำนวณหาขนาดของหม้อแปลงและไดโอดได้ โปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในการจำลองคือ โปรแกรม LEC 5.0 [เอกชัย ลีลารัศมี, 2530] โดยใช้วงจรในรูปที่ 4.8 การจำลอง



รูปที่ 4.8 แหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคกำลังที่ใช้ในการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

จากรูปคลื่นที่ได้จากการจำลองการทำงานของวงจรด้วยคอมพิวเตอร์ จะสามารถคำนวณหาค่ากระแสประสิทธิผลของหม้อแปลงเท่ากับ 32.4 แอมแปร์ ดังนั้นหม้อแปลงที่ใช้จะมีขนาดเท่ากับ 3564.4 โวลต์แอมแปร์ ส่วนค่ากระแสประสิทธิผลไดโอดเท่ากับ 22.9 แอมแปร์ จึงเลือกใช้ไดโอดเบอร์ KBPC 3808 ซึ่งทนกระแสได้ 28 แอมแปร์ เมื่ออุณหภูมิห้องเท่ากับ 60°C และทนแรงดันได้ 800 โวลต์

ส่วนค่าตัวต้านทาน Rc ที่ทำหน้าที่ลดค่ายอดของกระแสที่ไหลในช่วงแรก เมื่อต่อแรงดันไฟสลับ 110 โวลต์ เข้าวงจรได้มีการประมาณและทดลองจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อทำให้กระแสยอดมีค่าต่ำเพียงพอที่ยอมรับได้ โดยมีกระแสยอดสูงสุด 99 แอมแปร์ และเปลี่ยนเวลาในการปิดของหน้าสัมผัส S2 ที่เวลาต่างกัน สรุปได้ว่าเลือกค่า Rc เท่ากับ 1 โอห์ม และให้หน้าสัมผัส S2 ที่ถูกควบคุมโดยวงจรควบคุมการปิดเปิดปิดลงที่เวลา 260 มิลลิวินาที ไดโอดที่เลือกใช้สามารถทนกระแสเสิร์จ(I_{FSM}) ได้ถึง 400 แอมแปร์ ซึ่งเพียงพอที่จะรับกระแสเสิร์จในตอนเปิดเครื่องได้ การคำนวณค่าตัวต้านทานสำหรับให้ตัวเก็บประจุ (C) คายประจุ ตามมาตรฐาน วสท. 408 กำหนดให้ตัวเก็บประจุที่ใช้กับแรงดันไม่เกิน 600 โวลต์ จะต้องมีตัวต้านทานต่ออยู่เพื่อให้ตัวเก็บประจุคายประจุให้เหลือ 50 โวลต์ ภายใน 1 นาที ดังนั้นค่าตัวต้านทานใช้ในการคายประจุสามารถหาได้จากสมการ 4.3 ได้ค่าตัวต้านทาน Rc ประมาณ 4 กิโลโอห์ม เลือกใช้ค่า 3.9 กิโลโอห์ม กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในความต้านทาน เท่ากับ $(155)^2/3900 = 6$ วัตต์

$$50 = 1.1 \times 155 \exp(-60 / RC) \qquad (4.3)$$

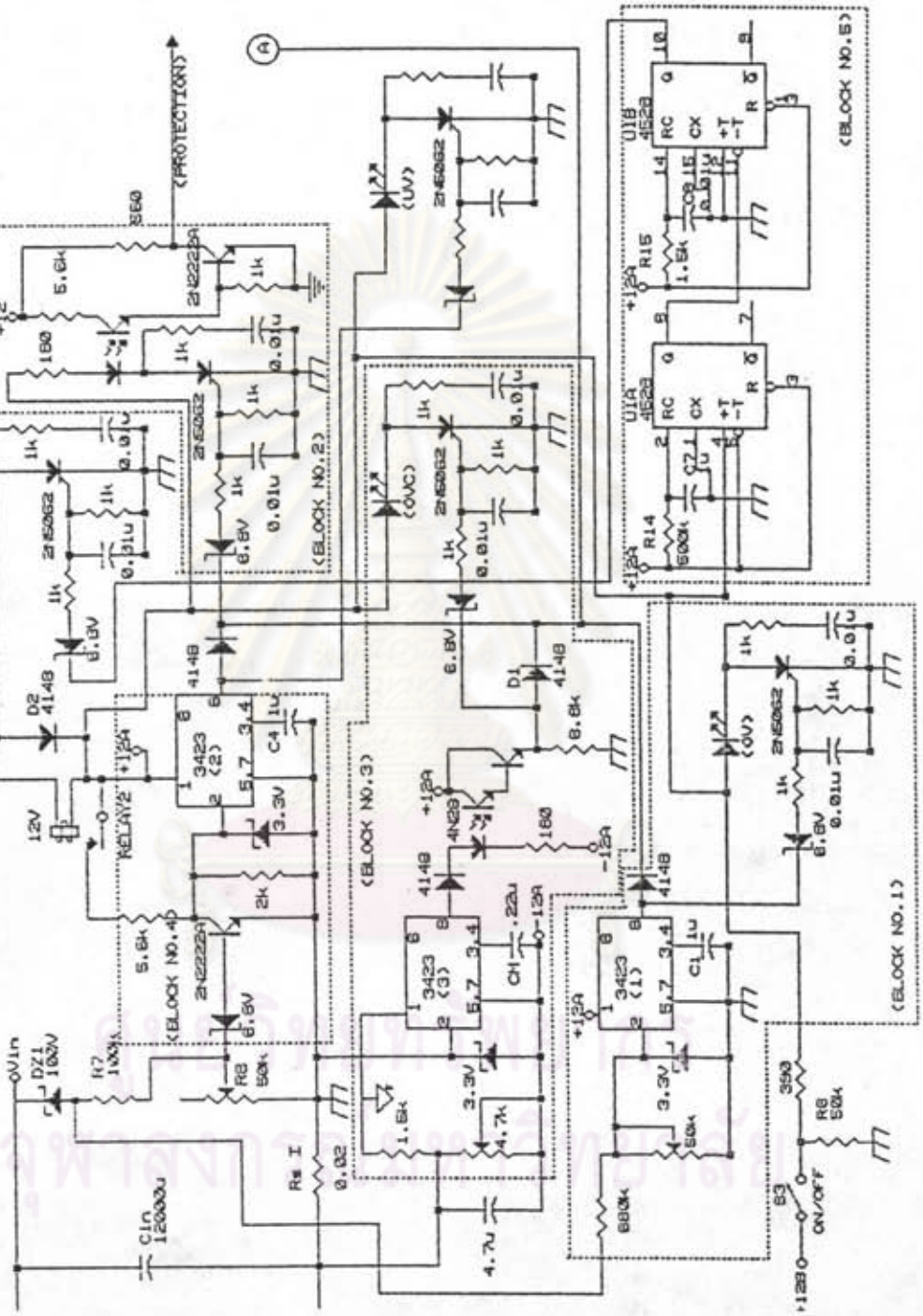
จึงเลือกใช้ Rc ค่า 3.9 กิโลโอห์ม 10 วัตต์

4.7.1.3 <u>วงจรควบคุมการปิดเปิด</u> อยู่ใน block no.2 และ block no.3 ในรูปที่ 4.7 วงจรดังกล่าวนี้ทำหน้าที่ควบคุมการต่อหรือตัดไฟฟ้ากระแสสลับเข้ากับหรือออกจากแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคกำลัง โดยการควบคุมการตัดต่อหน้าสัมผัส S1 ซึ่งทำหน้าที่ตัดต่อไฟฟ้ากระแสสลับเข้ากับวงจรเรียงกระแสและควบคุมการตัดต่อสวิตช์ S2 เพื่อเปิดหรือลัดวงจรตัวต้านทาน Rc ซึ่งทำหน้าที่จำกัดกระแสในตอนเริ่มเปิดเครื่อง ก่อนเปิดเครื่องหน้าสัมผัส S1 และ S2 จะอยู่ในสถานะปิดกั้นกระแส เมื่อทำให้สวิตช์ ON/OFF นำกระแส ในขณะที่สัญญาณที่จุด A ยังคงมีสถานะ 0 จะทำให้ทรานซิสเตอร์ TIP29 นำกระแสและสวิตช์ S_1 จะเข้าสู่สถานะการนำกระแสทันที ในขณะที่ S2 จะถูกหน่วงไม่ให้นำกระแสเป็นเวลาประมาณ 260 มิลลิวินาที เพื่อให้กระแสไหลผ่าน Rc ซึ่งทำหน้าที่จำกัดกระแสที่ประจุตัวเก็บประจุในตอนเริ่มแรกไม่ให้สูงเกินไป

เพื่อป้องอันตรายที่จะเกิดกับไดโอดของวงจรเรียงกระแสเนื่องจากกระแสเสิร์จ การหน่วงเวลาการต่อวงจรของสวิตช์ S2 ทำโดยการหน่วงเวลาการจุดชนวน SCR2 ซึ่งเป็นสวิตช์ควบคุมกระแสที่ใช้ในการกระตุ้นขดลวดควบคุมหน้าสัมผัส S2 การสร้างสัญญาณจุดชนวน SCR2 นี้มีการหน่วงเวลา 260 มิลลิวินาที ใช้วงจรเอกเสถียรเบอร์ 4528 2 ตัว คือ U2A และ U2B ต่อในลักษณะเดียวกันกับวงจรจำกัดวัฏจักรงานสูงสุดดังได้กล่าวมาแล้ว เมื่อ SCR2 ได้รับสัญญาณจุดชนวน จะนำกระแสและทำให้หน้าสัมผัส S2 ปิดวงจร กระแสออกของวงจรเรียงกระแสจะไหลผ่านหน้าสัมผัส S2 แทนการไหลผ่าน Rc อันเป็นการลดกำลังสูญเสียในตัวต้านทาน Rc การหยุดการทำงานของแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคกำลังอาจจะเกิดจากการเปิดสวิตช์ ON/OFF ซึ่งจะทำให้ทั้ง S1และ S2 หยุดนำกระแส หรือเกิดจากการทำงานของวงจรป้องกันซึ่งจะส่งสัญญาณมาที่จุด A เพื่อจุดชนวน SCR3 มาที่จุด A ซึ่งเมื่อ SCR3 นำกระแสจะทำให้ทรานซิสเตอร์ TIP29 หยุดนำกระแส ส่งผลให้หน้าสำผัส S1 เปิดวงจร แต่เนื่องจากสวิตช์ ON/OFF ยังคงนำกระแสดังนั้นหน้าสัมผัส S2 จะยังคงปิดวงจรอยู่และจะคงอยู่ในสถาวะนี้ตราบเท่าที่ แรงดัน +12B ยังคงมีอยู่และสวิตช์ ON/OFF ยังคงปิดวงจรอยู่ ดังนั้นในกรณีที่วงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงหยุดทำงานเนื่องจากสัญญาณจุดชนวนที่จุด A ก่อนเริ่มต้นเดินเครื่องจะต้องเปิดสวิตช์ ON/OFF สักระยะเวลาหนึ่งเสียก่อน รูปที่ 4.7 ยังแสดงตำแหน่งกราวด์ของแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคกำลัง ซึ่งจะเป็นคนละตำแหน่งกับกราวด์ในวงจรควบคุม ตัวต้านทาน Rs I ของแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคกำลังมีไว้สำหรับตรวจจับกระแสออกของวงจรเรียงกระแส เพื่อป้อนแก่วงจรป้องกันกระแสเกินของแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคกำลัง

4.7.1.4 <u>วงจรป้องกัน</u> ประกอบด้วยวงจรป้องกันแรงดันเกิน (over voltage protection), วงจรป้องกันกระแสเกิน (over current protection), วงจรป้องกันแรงดันต่ำเกิน (under voltage protection) วงจรทั้งสามได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.9 รวมทั้งวงจรที่ใช้สำหรับเชื่อมโยงสัญญาณจากวงจรป้องกันกับวงจรควบคุมด้วย

4.7.1.4.1 <u>วงจรป้องกันแรงดันเกิน</u> (over voltage protection) ทำหน้าที่ตัดแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคกำลังเมื่อแรงดันออกของแหล่งจ่ายไฟตรงดัง



รูปที่ 4.9 วงจรป้องกัน

กล่าวมีค่าสูงกว่าค่าพิกัดสูงสุดที่กำหนดคือ 170 โวลต์ วงจรป้องกันแรงดันเกินมีวงจรแสดงดังใน block no.1 ของรูปที่ 4.9 โดยใช้วงจรประมวล 3423(1) ในการตรวจจับระดับแรงดันออกของแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคกำลัง เพื่อให้การตรวจจับระดับแรงดันมีความไว(sensitivity)มากขึ้นจึงใช้ Zener diode (DZ1)ในการเลื่อนระดับแรงดันไฟตรงลงมา 100 โวลต์ แทนการใช้การลดแรงดันโดยการใช้วงจรแบ่งแรงดัน ทั้งนี้ทั้งนั้นเพราะการเลื่อนระดับไฟตรงลงมาโดยการใช้ Zener diode (DZ1) จะทำให้การเปลี่ยนแปลงของแรงดันถูกส่งผ่านไปยังวงจรตรวจจับระดับแรงดันมากขึ้น วงจรตรวจจับระดับแรงดันใช้ความต้านทาน 680 กิโลโอห์มและ ตัวต้านทานปรับค่าได้ขนาด 50 กิโลโอห์ม ทำหน้าที่เป็นวงจรแบ่งแรงดันเพื่อป้อนให้กับขา 2 ของวงจรประมวล 3423 ซึ่งจะให้แรงดันออกที่ขา 8 ต่อผ่านไดโอด 1N4148 ไปยังจุด A เพื่อจุดชนวน SCR3 (ในรูปที่ 4.7) เมื่อแรงดันที่ขา 2 มีระดับแรงดันสูงกว่า 2.6 โวลต์ ความต้านทานของวงจรแบ่งแรงดันได้รับการปรับเพื่อให้แรงดันที่ขา 2 มีค่า 2.6 โวลต์ เมื่อแรงดันออกของแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคกำลังมีค่าเท่ากับ 170 โวลต์ สัญญาณออกนอกจากจะใช้ในการจุดชนวน SCR3 แล้ว ยังทำหน้าที่ควบคุมให้วงจรควบคุมหยุดทำงาน เนื่องจากระดับแรงดันกราวด์ของวงจรควบคุมและแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคกำลังมีค่าต่างกัน ดังนั้นสัญญาณออกของวงจรป้องกันแรงดันเกินจะเชื่อมโยงไปยังวงจรภาคควบคุมผ่าน Opto coupler(4N28) ดังแสดงใน block no.2 เมื่อแรงดันออกของแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคกำลังมีค่ามากกว่า 170 โวลต์ แรงดันออกของวงจรประมวล 3423(1)จะทำให้ทางสัญญาณ PROTECTION เป็น 0 เนื่องจากทรานซิสเตอร์ 2N2222A นำกระแส และยังคงสถานะนี้ตลอดถ้าสวิตช์ ON/OFF ยังคงปิดวงจร เพื่อป้องกันการทำงานของวงจรป้องกันแรงดันเกินเนื่องจากแรงดัน spike จึงทำการหน่วงเวลา การทำงานของวงจรป้องกันแรงดันเกินไว้ 100 มิลลิวินาที เมื่อเกิดแรงดันเกิน โดยการใช้ C1 ขนาด 1ไมโครฟารัด ต่อเข้าที่ขา 3 ของวงจรประมวล 3423(1)

4.7.1.4.2 <u>วงจรป้องกันกระแสเกิน</u> (over current protection) ทำหน้าที่ตัดแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคกำลังเมื่อกระแสออกมีค่าเกินพิกัดที่กำหนดคือ 22 แอมแปร์ วงจรป้องกันกระแสเกินใช้วงจรตรวจจับแรงดันเช่นเดียวกันกับวงจรป้องกันแรงดันเกิน โดยใช้ตัวต้านทาน RsI ในการเปลี่ยนกระแส

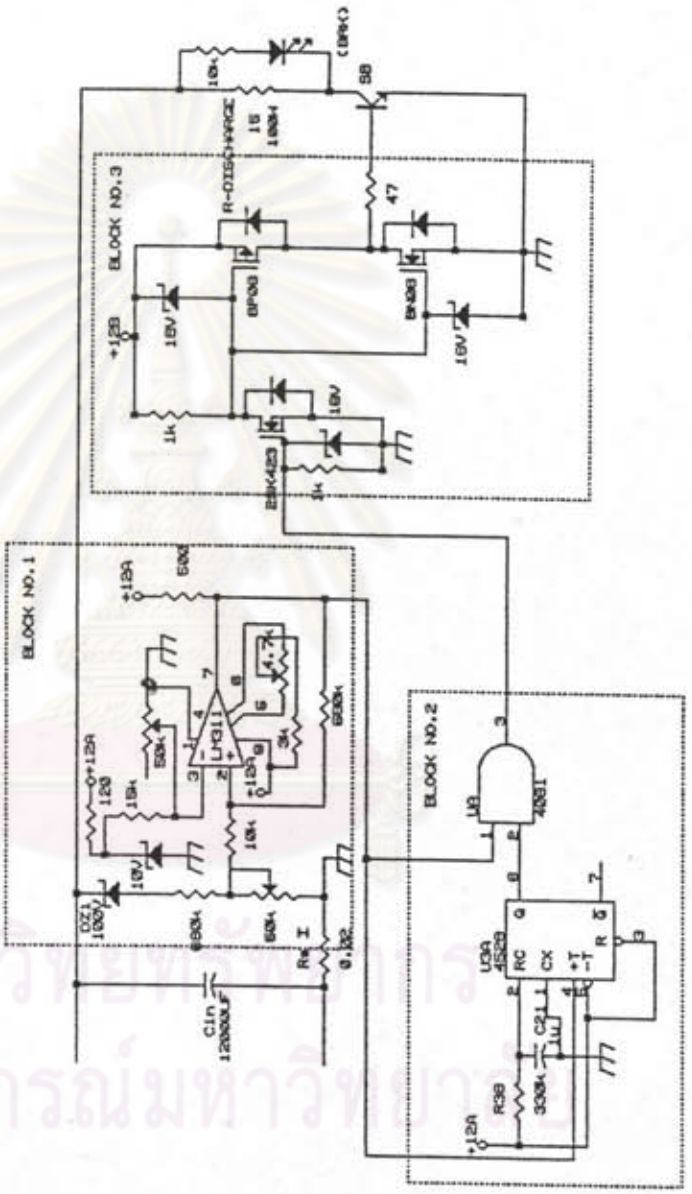
ให้เป็นแรงดันเพื่อป้อนให้กับวงจรป้องกันกระแสเกินซึ่งใช้วงจรประมวล 3423(3) เนื่องจากการทำงานของวงจรตรวจจับแรงดันทำงานที่ระดับแรงดันสูงถึง 2.6 โวลต์ ดังนั้นการนำแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานมาใช้โดยตรงคงต้องใช้แรงดันที่มีค่ามากซึ่งจะทำให้มีการสูญเสียมาก ดังนั้นจึงทำการสร้างแรงดันไฟลบอีกชุดหนึ่งมาจ่ายแก่ 3423(3)โดยเฉพาะ ซึ่งจะมีกราวด์คนละตำแหน่งกับในรูปที่ 4.7 เพื่อทำการยกระดับแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานดังแสดงใน block no.3 ของรูปที่ 4.9 ทำให้สามารถปรับระดับการเลื่อนแรงดันได้โดยใช้ความต้านทานที่ปรับค่าได้ขนาด 4.7 กิโลโอห์ม และใช้ตัวต้านทานดังกล่าวปรับค่ากระแสจำกัดได้ด้วยโดยจะมีปรับให้มีกระแสออกไม่ให้เกิน 22 แอมแปร์ และปรับการหน่วงเวลาโดยใช้ CM และได้ปรับให้มีการหน่วงเวลาก่อนการตัดวงจรไว้ที่ 5 มิลลิวินาที สัญญาณออกของวงจรป้องกันกระแสเกินจะต่อไปยังจุด A เพื่อจุดชนวน SCR3 ผ่านไดโอด 1N4148 และเชื่อมโยงกับภาคควบคุมโดยใช้ Opto coupler (4N28)

4.7.1.4.3 <u>วงจรป้องกันแรงดันต่ำเกิน</u> (under voltage protection) ทำหน้าที่ตัดแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคกำลัง เมื่อแรงดันออกของแหล่งจ่ายไฟสำหรับภาคกำลังมีค่าต่ำกว่าพิกัดที่กำหนดคือ 120 โวลต์ วงจรป้องกันแรงดันต่ำเกินใช้วงจรตรวจจับระดับแรงดันเช่นเดียวกับวงจรป้องกันกระแสเกินและแรงดันเกินดังได้กล่าวมาแล้ว แต่จะต้องทำงานกลับกันกับวงจรป้องกันแรงดันเกินโดยการใช้วงจรกลับเฟสที่ประกอบด้วย ทรานซิสเตอร์ 2N2222A ดังแสดงใน block no.4 ในรูปที่ 4.9 เนื่องจากวงจรป้องกันแรงดันต่ำเกินต้องทำงานหลังจากที่หน้าสัมผัส S1 ปิดวงจรและแรงดันออกของวงจรจ่ายไฟตรงภาคกำลังเข้าสู่ภาวะอยู่ตัวแล้ว ดังนั้นจึงต้องมีวงจรกำหนดการเริ่มต้นทำงานของวงจรป้องกันแรงดันต่ำเกิน ซึ่งประกอบด้วยวงจรหน่วงเวลาการจ่ายไฟเลี้ยงให้กับ Relay2 ดังแสดงใน block no.5 ในรูปที่ 4.9 โดยจะเริ่มจ่ายไฟเลี้ยงกับ Relay 2 หลังจากต่อวงจรโดยสวิตช์ ON/OFF แล้ว 300 มิลลิวินาที ซึ่งนานพอที่จะทำให้แรงดันออกของแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคกำลังเข้าสู่ในสถานะอยู่ตัว เมื่อ Relay 2 ปิดวงจรก็จะจ่ายแรงดันแก่ทรานซิสเตอร์ 2N2222A เป็นการเริ่มต้นการทำงานของวงจรป้องกันแรงดันต่ำเกิน วงจรป้องกันแรงดันต่ำเกินถูกตั้งค่าให้วงจรทำงานเมื่อแรงดันต่ำกว่า 120 โวลต์ และมีการหน่วงเวลาก่อนตัด

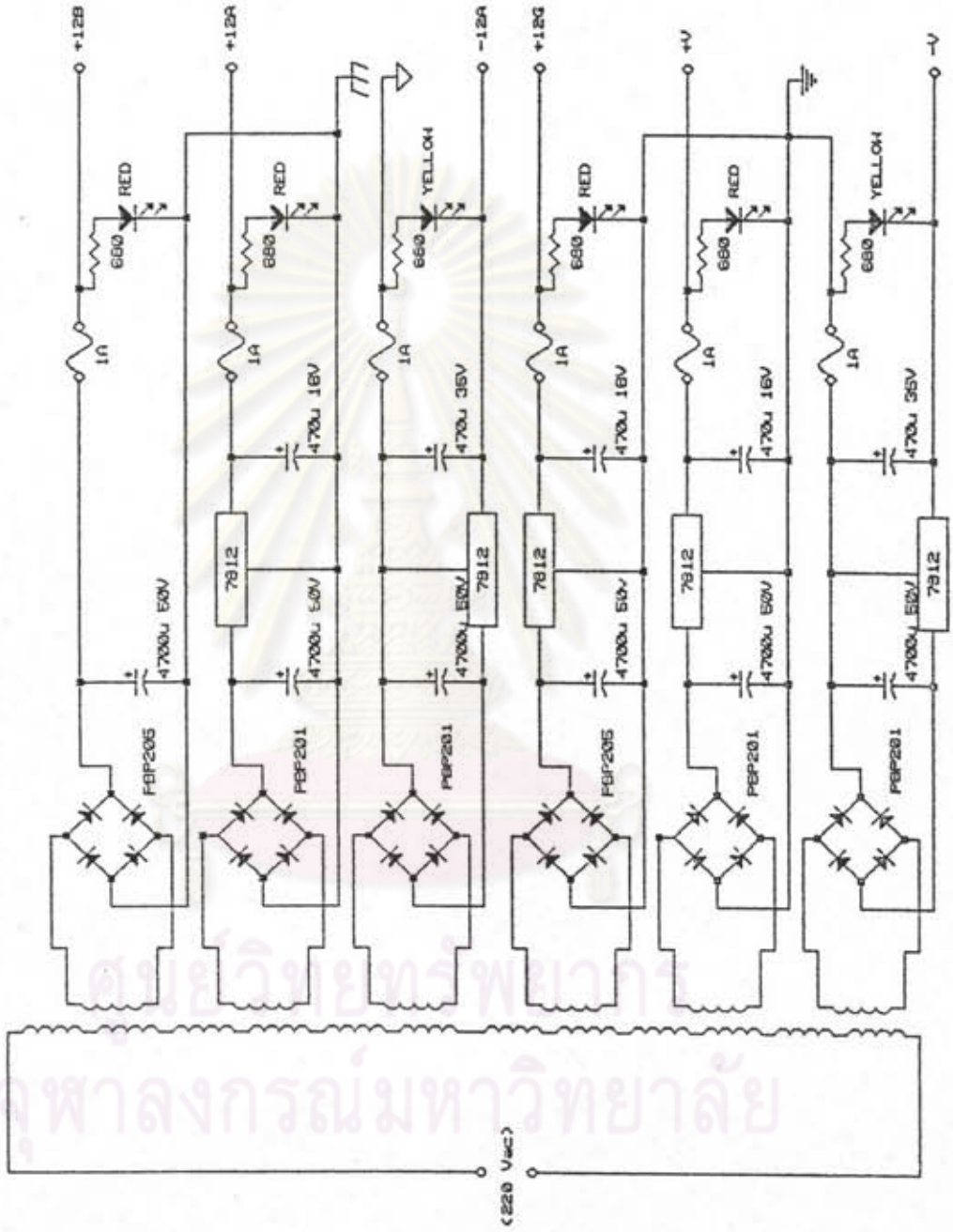
วงจรประมาณ 100 มิลลิวินาที โดยการใช้ตัวเก็บประจุ C4 ต่อเข้ากับขา 3 และ 4 ของวงจรประมวล 3423

4.7.1.4.4 วงจรคายประจุ ในระหว่างการลดความเร็วหรือกลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์พลังงานจลน์จากมอเตอร์จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าป้อนกลับเข้าไปในวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรง พลังงานดังกล่าวจะทำให้เกิดการประจุตัวเก็บประจุด้านเข้าของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง และไม่สามารถป้อนกลับเข้าไปในสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับได้ ซึ่งจะเป็นผลทำให้แรงดันของตัวเก็บประจุ Cin มีค่าสูงเกินไป เพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าวจึงทำการต่อวงจรตรวจจับระดับแรงดัน (วงจรใน block no.1 ของรูปที่ 4.10) ซึ่งจะต่อตัวต้านทานขนานกับตัวเก็บประจุ Cinเมื่อแรงดันสูงเกินพิกัดที่กำหนดและจะตัดตัวต้านทานออกเมื่อแรงดันลดลงมาถึงระดับที่กำหนด วงจรดังกล่าวใช้ ออปแอมป์ LM 311 ประกอบกับตัวต้านทานต่อเป็นวงจรเปรียบเทียบที่มี hysteresis ดังแสดงในรูปที่ 4.10 แรงดันออกของวงจรตรวจจับระดับแรงดันจะผ่านเข้าไปในวงจรจำกัดเวลาการทำงานของวงจรคายประจุ(วงจรใน block no.2) ซึ่งประกอบด้วยเกต AND(UA)1, และวงจรเอกเสถียร(U3A) ซึ่งจะทำหน้าที่ตัดตัวต้านทานที่ต่อขนานกับตัวเก็บประจุออกภายในเวลา 500 มิลลิวินาที ถ้าแรงดันออกคร่อมตัวเก็บประจุไม่ลดลงมาสู่พิกัดที่กำหนด สัญญาณออกจาก UA จะป้อนให้กับวงจรขับนำเบส (วงจรใน block no.3)ของทรานซิสเตอร์ที่ต่อตัวต้านทานเข้ากับตัวเก็บประจุดังแสดงในรูปที่ 4.10

4.7.2 แหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคควบคุม ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟสลับขนาด 220 โวลต์ ให้เป็นไฟตรงขนาด 12 โวลต์ เพื่อจ่ายให้แก่ทั้งภาคควบคุมของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง , วงจรป้องกันและวงจรควบคุมการปิดเปิด แหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคควบคุมนี้จะใช้หลักการออกแบบค่าอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่นเดียวกับการออกแบบแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคกำลัง แหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคควบคุมจะแบ่งออกเป็น 6 ชุด โดยทั้ง 6 ชุดรับแรงดันไฟสลับจากหม้อแปลงตัวเดียวกันซึ่งหม้อแปลงนี้จะทำการลดระดับแรงดันจาก 220 โวลต์ เป็นแรงดันไฟสลับขนาดประมาณ 13.5 โวลต์ 5 ชุด และ 9.5 โวลต์ 1ชุดดังแสดงในรูปที่ 4.11 จากรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าแหล่งจ่ายไฟตรงทั้ง 6 ชุด จะได้จากการแปลงไฟสลับที่รับจากหม้อแปลงเป็นไฟตรงด้วยวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์เต็มแล้วกรองแรงดันให้เรียบขึ้นด้วยตัวเก็บประจุขนาด 4700 ไมโครฟารัด เพื่อให้



รูปที่ 4.10 วงจรสายประจุ



รูปที่ 4.11 แหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคควบคุม

ค่าสูงสุดของการกระเพื่อมของแรงดันประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ ส่วนรายละเอียดเพิ่มเติมของแหล่งจ่ายไฟตรง แต่ละชุดจะเป็นดังนี้

ชุดที่ 1 สร้างแรงดันไฟตรง +12G ซึ่งมีขนาด +12 โวลต์ เพื่อจ่ายแก่วงจรขับนำเกต มีการคงค่าแรงดันออกด้วยวงจรประมาลเบอร์ 7812 แล้วกรองแรงดันให้เรียบขึ้นด้วยตัวเก็บประจุขนาด 470 ไมโครฟารัด

ชุดที่ 2 สร้างแรงดันไฟตรง +V ซึ่งมีขนาด +12 โวลต์ เพื่อจ่ายแก่ภาคควบคุมของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง มีการคงค่าแรงดันออกด้วยวงจรประมวลเบอร์ 7812 แล้วกรองแรงดันให้เรียบขึ้นด้วยเก็บประจุขนาด 470 ไมโครฟารัด

ชุดที่ 3 สร้างแรงดันไฟตรง -V ซึ่งมีขนาด -12 โวลต์ เพื่อจ่ายแก่ภาคควบคุมของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง มีการคงค่าแรงดันออกด้วยวงจรประมวลเบอร์ 7912 แล้วกรองแรงดันให้เรียบขึ้นด้วยตัวเก็บประจุ 470 ไมโครฟารัด

ชุดที่ 4 สร้างแรงดันไฟตรง +12 B ซึ่งมีขนาดประมาณ +12 โวลต์ เพื่อจ่ายแก่ส่วนต่าง ๆ ของวงจรป้องกันและวงจรควบคุมการปิดเปิด และวงจรคายประจุ ดังแสดงในรูปที่ 4.7, 4.9, 4.10 แรงดันไฟตรง +12B จะไม่มีการคงค่าแรงดันเนื่องจากนำไปจ่ายวงจรในส่วนที่ไม่ต้องการคงค่าแรงดันมากนัก

ชุดที่ 5 สร้างแรงดันไฟตรง +12A ซึ่งมีขนาดประมาณ +12 โวลต์ เพื่อจ่ายแก่ภาคควบคุมของวงจรป้องกันและวงจรควบคุมการปิดเปิด และวงจรคายประจุ มีการคงค่าแรงดันออกด้วยวงจรประมวลเบอร์ 7812 แล้วกรองให้เรียบขึ้นด้วยตัวเก็บประจุ 470 ไมโครฟารัด

ชุดที่ 6 สร้างแรงไฟตรง -12 A ซึ่งมีขนาด -12 โวลต์ เพื่อจ่ายแก่วงจรป้องกันกระแสเกิน มีการคงค่าแรงดันออกด้วยวงจรประมวลเบอร์ 7912 แล้วกรองให้เรียบขึ้นด้วยตัวเก็บประจุขนาด 470 ไมโครฟารัด

แหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคควบคุมแต่ละชุดจะมีไฟแสดงการทำงานของวงจรและมีฟิวส์ป้องกันแหล่งจ่ายไฟตรง แหล่งจ่ายไฟตรงชุดที่ 1,2,3 จะมีกราวน์ร่วมกับ ชุดที่ 4,5 ก็มีกราวด์ร่วมกัน แต่ไม่ใช่จุดเดียวกับ ชุดที่ 1,2,3 ส่วนชุดที่ 6 จะเชื่อมต่อกับชุดที่ 4,5 ดังแสดงในรูปที่ 4.9