

การออกแบบ และการจำลองการทำงานของวงจร  
แปลงผันไฟตรง-ไฟตรงและการขนาน

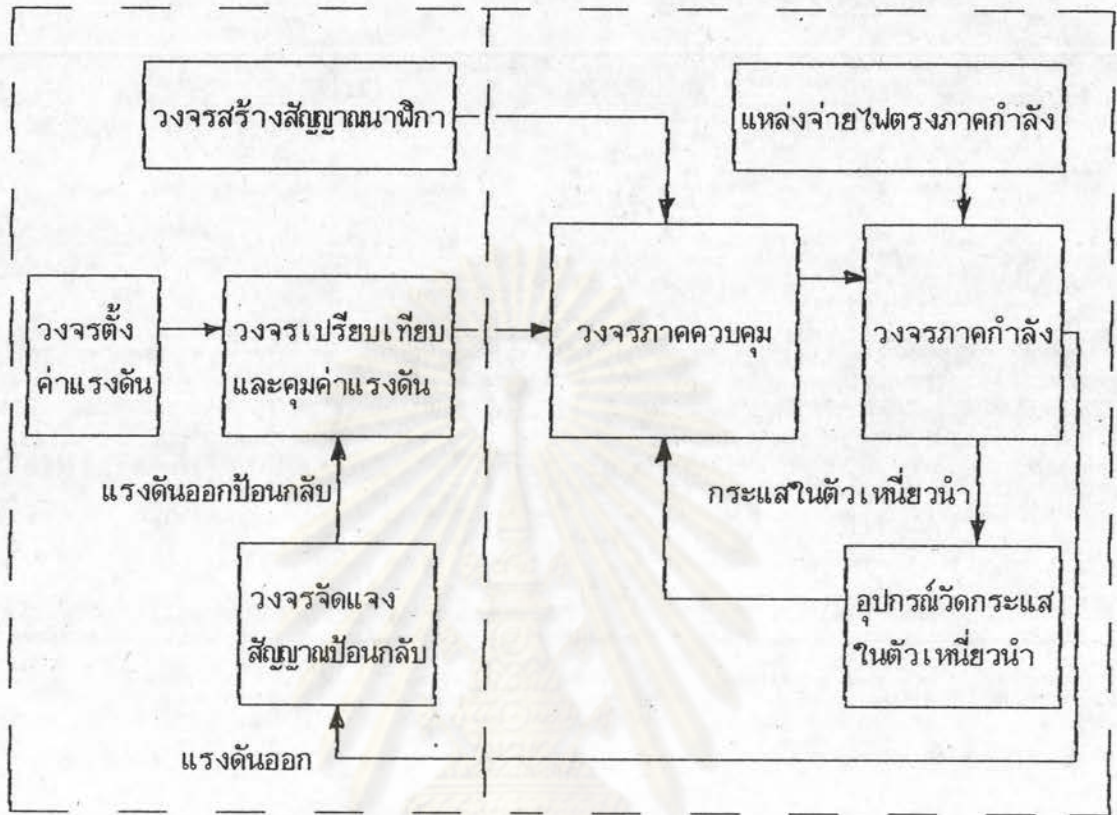
ในบทที่ผ่านมาได้มีการเลือกชนิดของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงรูปแบบการควบคุม วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ตลอดจนวิธีการขนานวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ในบทนี้ เป็นการออกแบบโครงสร้าง และลักษณะการทำงานของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง การออกแบบค่าอุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับการจำลองวงจร การออกแบบฟังก์ชันการโอนย้ายของวงจรคุมค่า เพื่อใช้ควบคุมวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ที่ขนานกัน ตลอดจนการจำลองการทำงานของชุด วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง และระบบที่ได้จากการขนานชุดวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อศึกษา และปรับปรุงระบบให้ดีขึ้นและใช้ในการเปรียบเทียบกับผลจาก การวัดจากชุดวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง และระบบที่ได้จากการขนานชุดวงจรที่สร้างขึ้น ส่วนการออกแบบ และเลือกอุปกรณ์อื่น ๆ ตลอดจนการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการ ควบคุมจะกล่าวในบทที่ 4

3.1 การออกแบบโครงสร้างการขนานวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง

การขนานวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง เพื่อจ่ายกำลังให้โหลดโดยมีการการควบคุม ให้แรงดันออกคงที่ ชุดวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแต่ละชุดวงจรจะเสมือนเป็นแหล่งจ่าย กระแส ซึ่งถูกควบคุมด้วยแรงดันอ้างอิงกระแส ( $v_c$ ) จากภาคควบคุม เพื่อให้แรงดันออกมีค่า ตามที่กำหนด มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.1 ระบบประกอบด้วยวงจรย่อยต่าง ๆ กัน ดังนี้

3.1.1 ชุดวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง

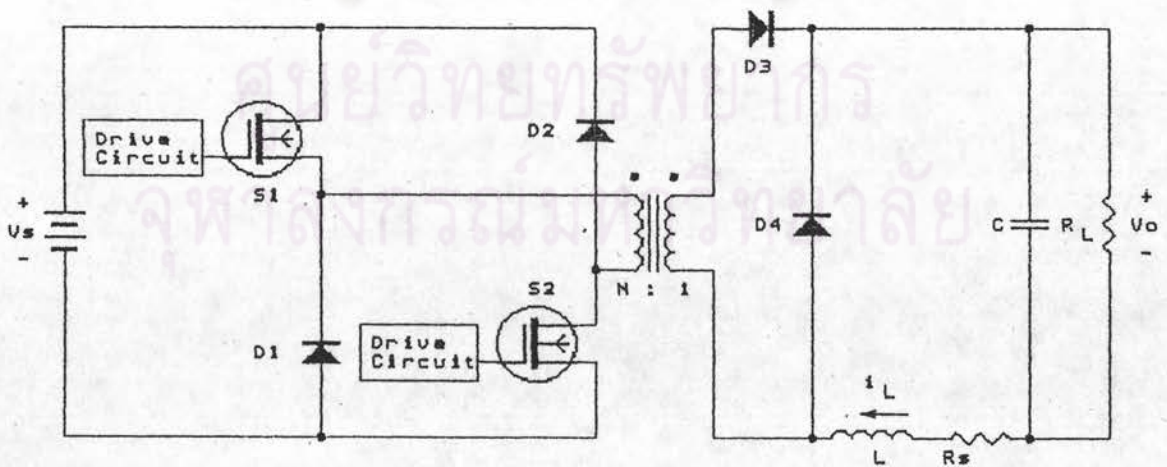
3.1.1.1 วงจรภาคกำลัง เป็นวงจรที่ทำหน้าที่ทอนแรงดันจากแรงดัน ขาเข้าที่สูง ให้เป็นแรงดันขาออกที่ต่ำ วงจรแสดงในรูปที่ 3.2 โดยวงจรที่ใช้จะเป็นวงจร บริดจ์ไม่สมมาตร (asymmetrical bridge) มีการควบคุมการทำงานของสวิตช์แบบ current-programmed mode ในภาวะการทำงานปกติ และการควบคุมจะเป็นแบบ current-programmed mode และ hysteretic control ร่วมกัน เมื่อเข้าสู่ภาวะการ จำกักระแสที่แรงดันขาออกต่ำมาก ๆ เช่น ในภาวะลัดวงจรขาออก โดยแรงดันขาเข้าที่สูง จะถูกลดแรงดันด้วยหม้อแปลงความถี่สูง และผ่านวงจรเรียงกระแส  $D_3$  แล้วใช้วงจร LC แบบผ่านต่ำมาเป็นวงจรกรอง ซึ่งการวางตำแหน่งของตัวเหนี่ยวนำ ดังในรูปที่ 3.2 เพื่อ ลดผลของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น [Billing, 1989] ส่วนไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$  นั้นจะเป็น



ภาคควบคุมรวม

ชุดวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง

รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมของการขนานวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง



รูปที่ 3.2 วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง



ตัวรีเซตกระแสทำแม่เหล็ก (magnetizing current) และตำแหน่งกราวด์ของด้านออกจะเป็นกราวด์เดียวกับกราวด์ของระบบควบคุม โดยใช้ความต้านทาน  $R_u$  เป็นตัววัดกระแสในตัวเหนี่ยวนำ ( $I_L$ )

ส่วนวงจรขับนำสวิตช์นั้นเป็นวงจรที่รับคำสั่งจากวงจรภาคควบคุมเพื่อขับนำสวิตช์  $S_1$  และ  $S_2$  ของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง และการใช้กระแสในตัวเหนี่ยวนำในการป้อนกลับเพื่อควบคุมการทำงานของสวิตช์ เพราะการควบคุมดังกล่าวจะต้องใช้ความชันด้านขาลงของกระแสในตัวเหนี่ยวนำมาควบคุมด้วย ซึ่งมีข้อเสีย คือ ไม่สามารถจำกัดกระแสในสวิตช์ได้ ซึ่งอาจเกิดกระแสเกินพิกัดเนื่องจากการอิ่มตัวของแกนหม้อแปลง ดังนั้นจึงต้องมีวงจรป้องกันไม่ให้สวิตช์มีกระแสเกินพิกัด

3.1.1.2 วงจรภาคควบคุม เป็นวงจรที่ทำหน้าที่ควบคุมกระแสในตัวเหนี่ยวนำ ในภาวะปกติการทำงานจะเป็นแบบ current programmed mode โดยการเปรียบเทียบค่ากระแสในตัวเหนี่ยวนำขาขึ้นของวงจรกำลัง ให้มีค่าสูงสุดเท่ากับสัญญาณคำสั่งกระแสบวกผลของค่าสูงสุดของฮีสเตอร์ซิส ส่วนขาลงของกระแสในตัวเหนี่ยวนำนั้น จะมีค่าต่ำกว่า หรือเท่ากับสัญญาณคำสั่งกระแสลบด้วยค่าต่ำสุดของฮีสเตอร์ซิส และความถี่การทำงานของสวิตช์จะคงที่ แต่ในภาวะจำกัดกระแสที่การทำงานแบบ current programmed mode นั้นไม่สามารถควบคุมได้ การทำงานจะเป็นแบบ current programmed mode และ hysteretic control ร่วมกัน โดยช่วงการทำงานที่สวิตช์นำกระแสจะทำงานลักษณะเดียวกับในภาวะปกติส่วนขาลงของกระแสในตัวเหนี่ยวนำนั้นในภาวะการทำงานแบบ current programmed mode นั้น จะมีค่าต่ำกว่าหรือเท่ากับคำสั่งกระแสลบด้วยค่าต่ำสุดของฮีสเตอร์ซิส ถ้ามีค่ามากกว่าคำสั่งกระแสลบด้วยค่าต่ำสุดของฮีสเตอร์ซิส สวิตช์จะไม่นำกระแสจนกว่าขาลงของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับคำสั่งกระแสลบด้วยค่าต่ำสุดของฮีสเตอร์ซิส และมีสัญญาณนาฬิกา มาขับนำสวิตช์ ในภาวะนี้ความถี่การทำงานจะมีค่าต่ำลง โดยสัญญาณออกจากการเปรียบเทียบนี้ จะเป็นสัญญาณที่ใช้ควบคุมการขับนำสวิตช์ของวงจรภาคกำลัง สัญญาณคำสั่งกระแสดังกล่าวจะเป็นสัญญาณควบคุมกระแสจากวงจรเปรียบเทียบ และคุมค่าแรงดันในภาคควบคุมรวม โดยลดขนาดลงด้วยค่าสัญญาณนั้นเล็กน้อยเซย์ วงจรเปรียบเทียบกระแสและวงจรตรรกะจะทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของสวิตช์ วงจรภาคควบคุมดังกล่าว จะมีโครงสร้างดังรูปที่ 3.3

3.1.1.2.1 วงจรตรรกะ ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของสวิตช์โดยอาศัยสัญญาณนาฬิกาจากภาคควบคุมรวม สัญญาณออกของวงจรเปรียบเทียบกระแสและสัญญาณจากการเปรียบเทียบกระแสสวิตช์เพื่อใช้ป้องกันสวิตช์ โดยการทำงานของสวิตช์จะนำด้วยสัญญาณนาฬิกา ถ้ากระแสในตัวเหนี่ยวนำ มีค่าเท่ากับสัญญาณคำสั่งกระแสวงจรถือเปรียบเทียบก็จะควบคุมให้สวิตช์หยุดนำ และเมื่อสัญญาณควบคุมให้สวิตช์หยุดนำมีคำสั่งต่อไป ถึงแม้มี





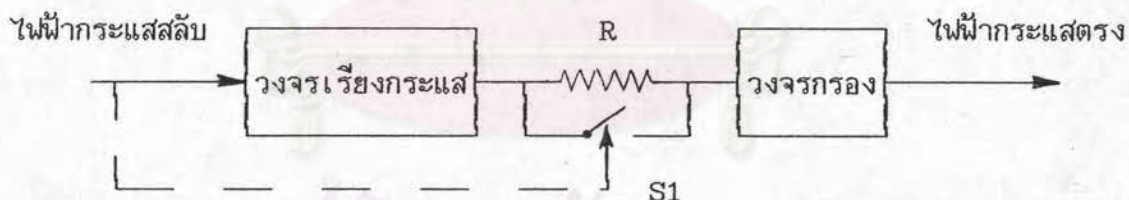


3.1.1.2.4 วงจรมีป้องกันกระแสเกิน ทำหน้าที่เปรียบเทียบค่าอ้างอิงกับสัญญาณกระแสสวิตช์ที่ได้จากวัด โดยใช้หม้อแปลงกระแส เพื่อป้องกันความเสียหายของสวิตช์ เนื่องจากผลของการอิ่มตัวของแกนหม้อแปลง ในภาวะที่กระแสในสวิตช์มีค่าน้อยกว่าค่าอ้างอิง จะทำให้สัญญาณเป็น 1 แต่เมื่อกระแสในสวิตช์มีค่ามากกว่าค่าอ้างอิง จะให้สัญญาณเป็น 0 ป้อนให้กับวงจรตรรก

3.1.1.2.5 วงจรถล และวงจรมีจำกัดค่ากระแส ทำหน้าที่ลบสัญญาณคำสั่งกระแสที่ได้จากภาคควบคุมรวม ด้วยสัญญาณพื้นเหลือขดเซย์ โดยสัญญาณออกจากวงจรถล และวงจรมีจำกัดค่ากระแสจะเป็นสัญญาณกำหนดค่าสูงสุดของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ

3.1.1.2.6 วงจรมีสร้างสัญญาณพื้นเหลือขดเซย์ ทำหน้าที่สร้างสัญญาณพื้นเหลือที่มีความลาดชันเป็นบวก ลบกับสัญญาณคำสั่งกระแส การเลือกใช้สัญญาณพื้นเหลือที่มีขนาดความลาดชันที่เหมาะสม จะเป็นสิ่งจำเป็นต่อเสถียรภาพของวงจรถลกระแส เมื่อวัฏจักรงานของสวิตช์มากกว่า 0.5 แต่วงจรมีกำลังแบบบริดจ์ไม่สมมาตรนั้น วัฏจักรงานสูงสุดไม่เกิน 0.5 ดังนั้นผลของเสถียรภาพวงจรมีจึงไม่มีปัญหา แต่การที่มีพื้นเหลือขดเซย์นี้เพื่อทำให้กระแสในตัวเหนี่ยวนำเข้าสู่ภาวะอยู่ตัวเร็วขึ้น

3.1.1.3 แหล่งจ่ายไฟตรงภาคกำลัง ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อจ่ายพลังงานให้กับภาคกำลังของวงจรมีแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง มีส่วนประกอบต่าง ๆ ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 บล็อกไดอะแกรมของแหล่งจ่ายไฟตรงภาคกำลัง

3.1.1.3.1 วงจรมีเรียงกระแส จะทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ เป็นไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ 300 โวลต์ โดยทั่วไป แรงดันออกของวงจรมีเรียงกระแสจะมีองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับอยู่มาก

3.1.1.3.2 วงจรมีกรอง จะทำหน้าที่กรององค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับ ออกจากไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายให้กับวงจรมีแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ทำให้แรงดันออกของวงจรมีกรองมีการกระเพื่อมน้อยลง โดยมีการกระเพื่อมน้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณไฟฟ้ากระแสตรง



3.1.1.3.3 วงจรป้องกันกระแสกระชากในตอนเปิดเครื่อง จะใช้รีเลย์ในการตัดต่อวงจร โดยรีเลย์จะใช้ไฟฟ้กระแสสลับ 220 โวลต์ ควบคุมการตัดต่อวงจรเนื่องจากรีเลย์มีเวลาล่าช้าก่อนตัดต่อวงจรประมาณ 10 มิลลิวินาที คือ เมื่อเปิดเครื่อง  $S_1$  จะเปิดวงจร ความต้านทาน  $R$  จะจำกัดกระแสที่ใช้ในการประจุตัวเก็บประจุของวงจรองมีค่าเข้าสู่ภาวะอยู่ตัวภายในเวลาล่าช้าของตัวรีเลย์ หลังจากนั้น  $S_1$  จะปิดวงจรเพื่อไม่ให้เกิดกำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน  $R$

3.1.1.4 อุปกรณ์วัดกระแสในตัวเหนี่ยวนำ ทำหน้าที่วัดกระแสในตัวเหนี่ยวนำ และจัดแจงอยู่ในรูปของแรงดันเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับสัญญาณคำสั่งกระแส

### 3.1.2 ภาคควบคุมรวม

3.1.2.1 วงจรตั้งค่า เป็นวงจรที่ทำหน้าที่สร้างสัญญาณตั้งค่า ของตัวแปรด้านนอกที่ควบคุม คือ แรงดันออก โดยสัญญาณตั้งค่าจะเป็นแรงดันและสัญญาณออกของวงจรตั้งค่าจะป้อนให้กับวงจรเปรียบเทียบ และคุมค่าแรงดัน

3.1.2.2 วงจรจัดแจงสัญญาณป้อนกลับ ทำหน้าที่วัดค่าของแรงดันออก และจัดแจงให้มีลักษณะของสัญญาณที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับสัญญาณตั้งค่า

3.1.2.3 วงจรเปรียบเทียบ และคุมค่าแรงดัน เป็นวงจรที่ทำหน้าที่ควบคุมให้แรงดันออกของระบบที่ได้จากการขนาน มีค่าเท่ากับแรงดันตั้งค่า ทำได้โดยการเปรียบเทียบค่าแรงดันตั้งค่ากับค่าแรงดันออกที่ป้อนกลับ จากวงจรจัดแจงสัญญาณป้อนกลับ และจัดแจงสัญญาณความคลาดเคลื่อน ให้เป็นสัญญาณคำสั่งกระแสสำหรับชุดวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ทุกชุด เนื่องจากแรงดันออกของทุกชุดวงจร มีความสัมพันธ์โดยตรงกับกระแสในตัวเหนี่ยวนำ ในภาวะอยู่ตัวค่ากระแสออกของแต่ละชุดวงจร มีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ ดังนั้นแรงดันออกของระบบจะมีค่าเท่ากับ ผลคูณของอิมพีแดนซ์ของโหลดกับผลรวมกระแสออกทุกชุดวงจร ดังนั้น วงจรเปรียบเทียบและคุมค่าแรงดันออกจะปรับค่าสัญญาณคำสั่งกระแส เพื่อที่จะทำให้แรงดันออก มีค่าเท่ากับสัญญาณค่าตั้งจากวงจรตั้งค่า และฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรคุมค่าจะมีผลต่อลักษณะสมบัติ และเสถียรภาพของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ดังนั้น จำเป็นต้องออกแบบฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรเปรียบเทียบ และคุมค่าให้เหมาะสมกับลักษณะของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง และแรงดันออกที่ต้องการควบคุม

3.1.2.4 วงจรสร้างสัญญาณนาฬิกา เป็นวงจรที่สร้างสัญญาณนาฬิกา ความถี่คงที่ ป้อนให้กับภาคควบคุมของชุดวงจรทุกชุด เพื่อให้การขับนำสวิตซ์กำลังในชุดวงจรแต่ละชุดพร้อมกัน และมีความถี่เดียวกัน

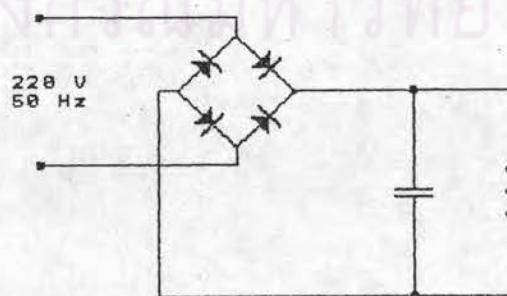


### 3.2 การออกแบบชุดวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง

จากโครงสร้างของชุดวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ดังได้กล่าวมาแล้ว สามารถจำแนกออกเป็น 2 ส่วน คือ ภาคกำลัง และภาคควบคุม ในหัวข้อต่อไปนี้จะกล่าวเฉพาะการออกแบบค่าของอุปกรณ์ในภาคกำลัง เพื่อให้สามารถหาฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรภาคกำลัง ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการออกแบบวงจรเปรียบเทียบและคุมค่าในภาคควบคุมรวม การวิเคราะห์การทำงานของชุดวงจร และระบบที่ได้จากการขนานชุดวงจร จำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์เนื่องจากการทำงานของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง เป็นวงจรไม่เชิงเส้นซึ่งยากต่อการวิเคราะห์ และคำนวณด้วยมือ สำหรับการออกแบบค่าอุปกรณ์อื่น และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ จะกล่าวถึงในบทต่อไป

3.2.1 การเลือกความถี่ในการสวิตช์ ความถี่การทำงานของสวิตช์ควรมีค่าสูงกว่าเสียงที่คนได้ยินเพื่อลดปัญหาเสียงรบกวน และเพื่อลดขนาดแกนหม้อแปลงตลอดจนขนาดของวงจรกรองด้านขาออก อย่างไรก็ตาม ความถี่ที่ใช้ในการสวิตช์ก็ไม่ควรสูงเกินไป เพราะทำให้เกิดการสูญเสียในสวิตช์มากเกินไปในช่วงการสวิตช์ และการลดขนาดของหม้อแปลงก็ไม่อาจลดลงไปได้มากนักถ้าจะกำลังออกเท่ากันเมื่อเพิ่มความถี่ในการสวิตช์สูงมาก เพราะความถี่สูงสิ่งที่ต้องคำนึงในการออกแบบหม้อแปลง คือ กำลังสูญเสียในแกนหม้อแปลง (core loss) ทำให้ต้องลดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุด ( $B_{max}$ ) ลงมา นั่นคือแทนที่ใช้ความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุดในการออกแบบหม้อแปลง กลับต้องใช้ข้อกำหนดของกำลังสูญเสียในแกนหม้อแปลงแทน นอกจากนี้ยังมีปัญหาสัญญาณกวน ดังนั้นจึงเลือกความถี่การสวิตช์ให้มีค่าประมาณ 45 กิโลเฮิรตซ์

3.2.2 การออกแบบวงจรเรียงกระแส และวงจรกรอง วงจรเรียงกระแสที่ใช้เป็นวงจรบริดจ์ มีตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรอง ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งขนาดอุปกรณ์ที่ต้องการทราบ คือ ตัวเก็บประจุ และพิกัดของไดโอด ถ้ากำหนดให้การกระเพื่อมของแรงดันไฟตรงมีค่าขอดถึงขอดประมาณ 20% ของค่าแรงดันไฟตรงสูงสุด



รูปที่ 3.5 วงจรเรียงกระแส และวงจรกรอง



แรงดันค่าเข้ามีค่า	220	$V_{ac}$
แรงดันไฟตรงสูงสุด (ถ้าไม่มีการกระเพื่อม)	$220 \times 1.414 = 310$	$V_{dc}$
เราออกแบบโดยเลือกแรงดันกระเพื่อมเท่ากับ 20% ดังนั้น		
แรงดันกระเพื่อม ( $V_r$ )	$= 0.2 \times 310$	$V_{p-p}$
	$= 62$	$V_{p-p}$
แรงดันไฟตรงเฉลี่ย	$= \text{แรงดันไฟตรงสูงสุด} - V_r/2$	
	$= 280$	$V_{dc}$
ประมาณค่าประสิทธิภาพของวงจรบริดจ์ไม่สมมาตรเท่ากับ 80% ดังนั้น		
กำลังขาเข้า	$= \text{กำลังขาออก} / \text{ประสิทธิภาพ}$	(3.1)
โดยที่ กำลังขาออก	$= \text{แรงดันขาออก} \times \text{กระแสขาออก}$	
	$= 30 \times 20 = 600$	วัตต์

จากสมการ (3.1)

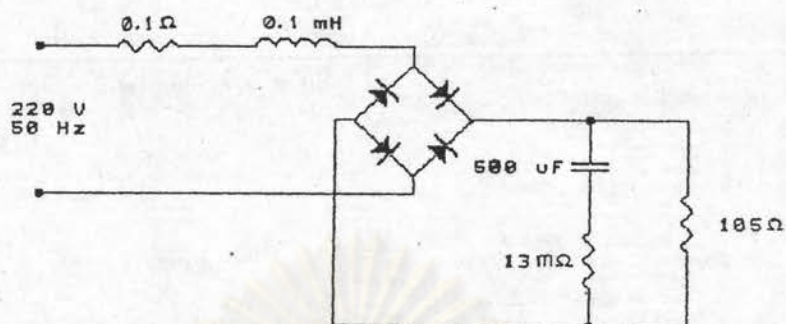
กำลังขาเข้า	$= 600/0.8 = 750$	วัตต์
ค่าตัวเก็บประจุ C	$= I \times t / V_r$	(3.2)
โดยที่ I	$= \text{กำลังไฟขาเข้า} / \text{แรงดันขาเข้า}$	
	$= 750/280$	
	$= 2.67$	A
t	$= 1/2 \text{ ของคาบของไฟฟ้ากระแสสลับ}$	
	$= 10$	ms

จากสมการ (3.2)  $C = (2.67 \times 0.01)/62$   
 $= 430$   $\mu F$

ดังนั้นจึงเลือกตัวเก็บประจุ 1,000 ไมโครฟารัด ทนแรงดันได้ 200 โวลต์ 2 ตัว  
 อนุกรมจะได้ C เท่ากับ 500 ไมโครฟารัด ทนแรงดันไฟตรงได้ 400 โวลต์ มีความต้านทาน  
 สมมูลในตัวเก็บประจุประมาณ 13 มิลลิโอห์ม

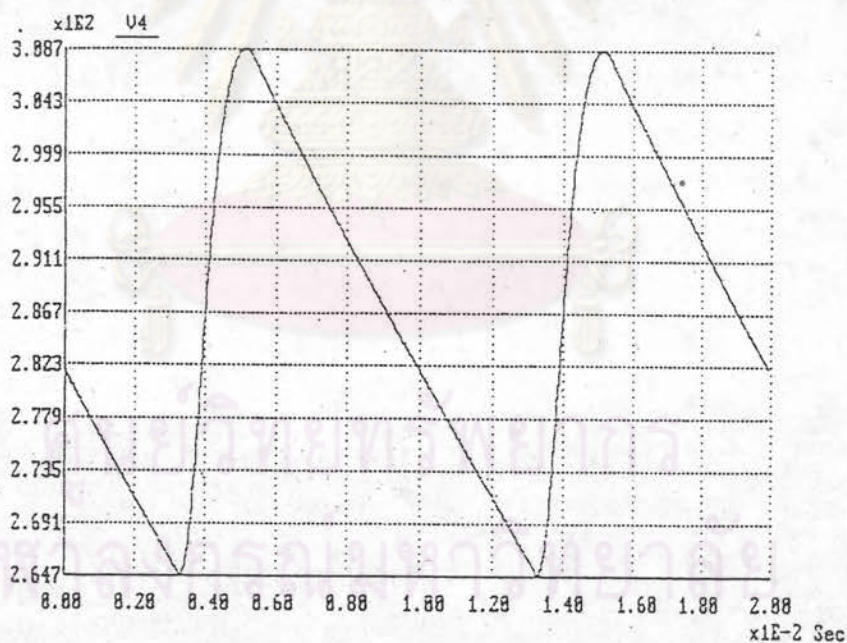
ในการคำนวณหาฟิวด์ไดโอด จะต้องรู้อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย และสายป้อน  
 อุปกรณ์กำลังต่ำ อิมพีแดนซ์ของสายป้อนจะมีผลมากกว่า ในที่นี้สมมติให้สายขนาด 10 mm<sup>2</sup>  
 ยาว 25 เมตร มีความต้านทาน 0.1 โอห์ม และตัวเหนี่ยวนำ 0.1 mH และจากที่กล่าวมา  
 แรงดันไฟตรงเฉลี่ยเท่ากับ 280  $V_{dc}$  และกระแสขาเข้าเท่ากับ 2.67 A ดังนั้นวงจรแปลงผัน  
 ไฟตรง-ไฟตรง จะมีความต้านทานสมมูลประมาณ 105 โอห์ม จะใช้ค่าต่างๆ นำวงจรเรียง  
 กระแส ดังรูปที่ 3.6 ไปวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม LEC [เอกชัย ลีลาธรรม, 2530]





รูปที่ 3.6 วงจรเรียงกระแสที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์

แรงดันระลอก (โวลต์)



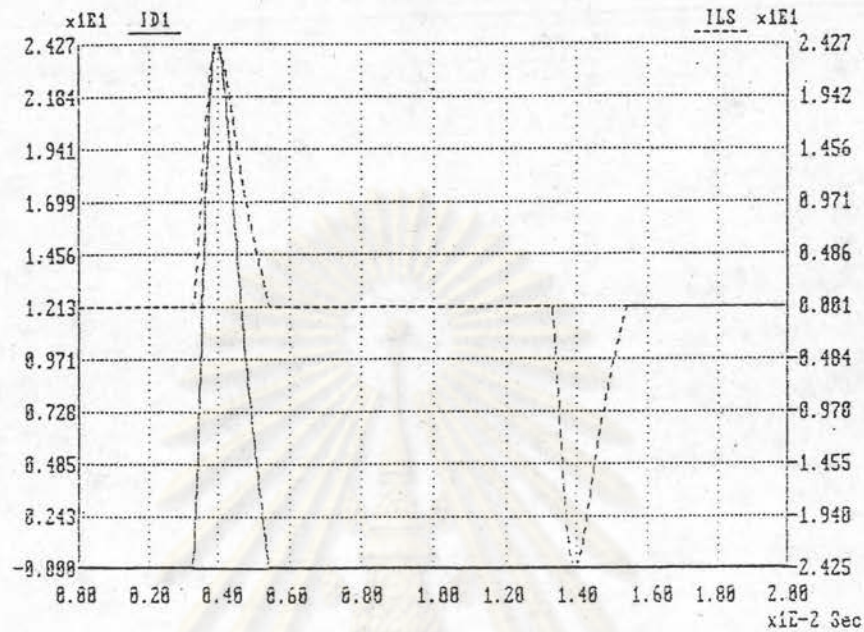
รูปที่ 3.7 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ

จากรูปที่ 3.7 จะเห็นได้ว่าแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุอยู่ระหว่าง 265 โวลต์ 309 โวลต์ มีแรงดันไฟตรงเฉลี่ย 287 โวลต์ และแรงดันระลอก 44 โวลต์ ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ ออกแบบไว้ในตอนแรก



กระแสในไดโอด (แอมแปร์)

กระแสสลับด้านเข้า (แอมแปร์)



รูปที่ 3.8 กระแสในไดโอด และกระแสสลับขาเข้า

รูปที่ 3.8 แสดงรูปคลื่นของกระแสในไดโอด และกระแสสลับขาเข้า สามารถหาค่ากระแสอาร์เอ็มเอสที่ไหลผ่านไดโอดแต่ละตัว และกระแสอาร์เอ็มเอสของกระแสสลับขาเข้าได้ โดยประมาณกระแสเป็นคลื่นรูปไซน์ครึ่งคาบ ค่ากระแสอาร์เอ็มเอสคำนวณได้จากจากสมการ (3.3)

$$I_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot I_{peak} \cdot \sqrt{\frac{t}{T}} \quad (3.3)$$

- จากรูปกระแสในไดโอด :
- : ช่วงเวลาที่นำกระแส (t) เท่ากับ 2.1 ms
  - : คาบของเวลารูปคลื่นกระแส (T) เท่ากับ 20 ms
  - : ค่ากระแสยอด ( $I_{peak}$ ) เท่ากับ 24.3 A

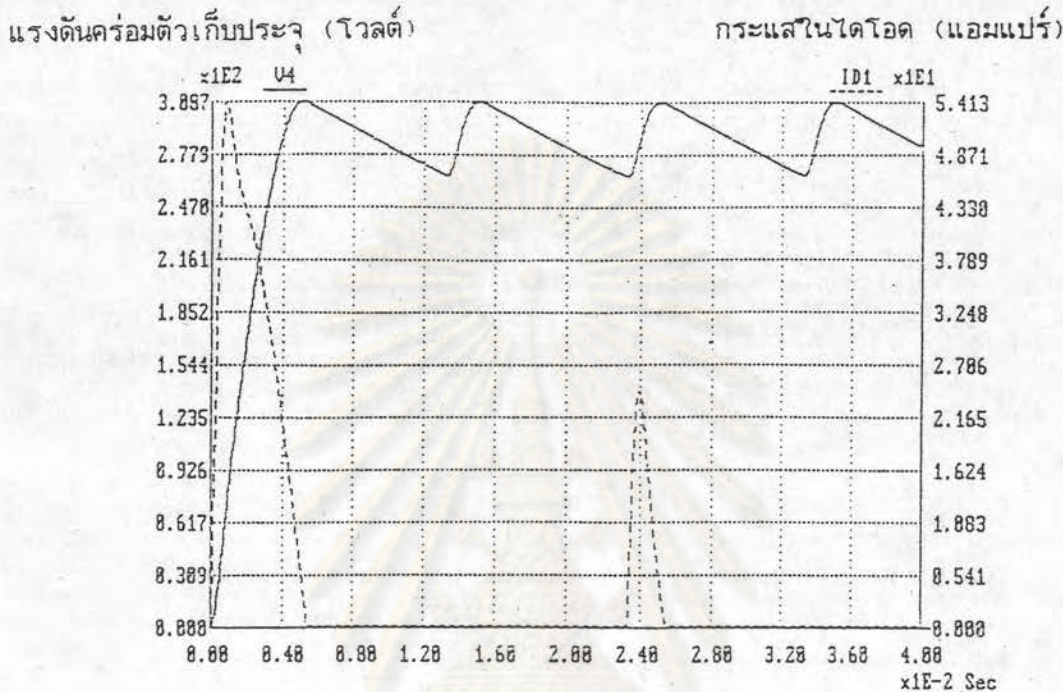
$$\begin{aligned} \text{จากสมการ (3.3)} \quad I_{rms} &= (24.3/\sqrt{2}) \cdot \sqrt{(2.1/20)} \\ &= 5.56 \quad \text{A} \end{aligned}$$

ส่วนกระแสอาร์เอ็มเอสของกระแสสลับขาเข้านั้นจะมีการนำกระแสเป็น 2t เท่ากับ

4.2 ms



ดังนั้น  $I_{rms} = 7.68 \text{ A}$



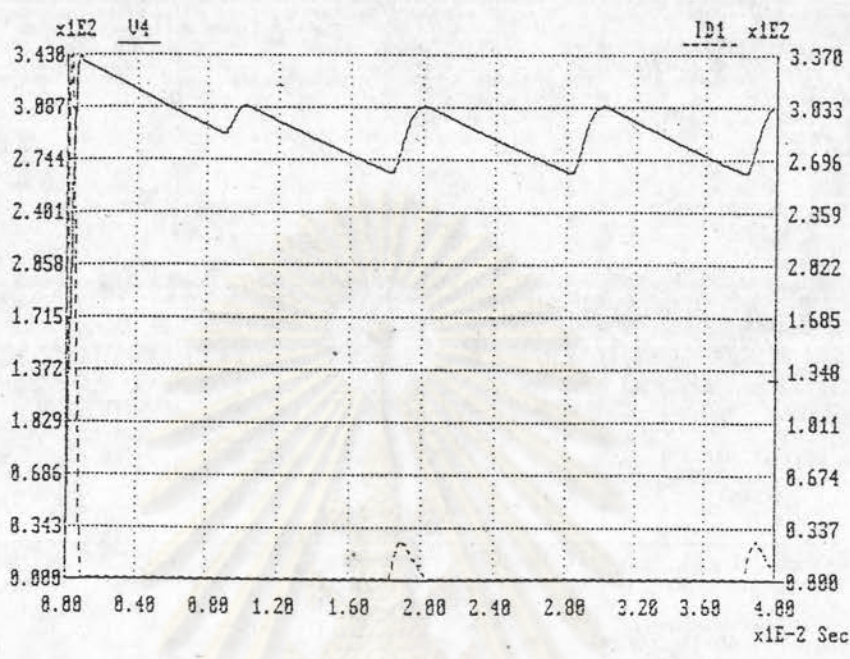
รูปที่ 3.9 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสสลับขาเข้า เมื่อแรงดันไฟสลับขาเข้าเป็นไซน์

จากการคำนวณกระแสอาร์เอ็มเอสผ่านไดโอดเท่ากับ 5.56 แอมแปร์ เราเลือก ไดโอดที่มีพิกัดกระแสเท่ากับ 12 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิตัวถัง 55 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถทน ค่าขอดกระแส ( $I_{FSM}$ ) ในช่วงเวลา 16.67 ms ได้ 250 แอมแปร์ [MOTOROLA INC., 1980] และจากการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์โดยให้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้าเป็น ไซน์ และโคไซน์ ดังแสดงในรูปที่ 3.9 และรูปที่ 3.10 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าขอดกระแส เมื่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้าเป็นโคไซน์มีค่าเท่ากับ 343 แอมแปร์ ซึ่งไดโอดที่ออกแบบ ไว้ไม่สามารถจะทนได้ ดังนั้นจะใช้ความต้านทาน 5 โอห์ม อนุกรมก่อนเข้าตัวเก็บประจุ เพื่อจำกัดค่าขอดกระแสในช่วงแรกที่เริ่มทำงานโดยความต้านทานอนุกรมนี้จะชานกับหน้าสัมผัส ของรีเลย์ ความต้านทานอนุกรมจะถูกตัดออกจากวงจร ด้วยความล่าช้าของรีเลย์ซึ่งมีค่า ประมาณ 10 ms สามารถข้มูเลตตามรูปวงจรรูปที่ 3.11

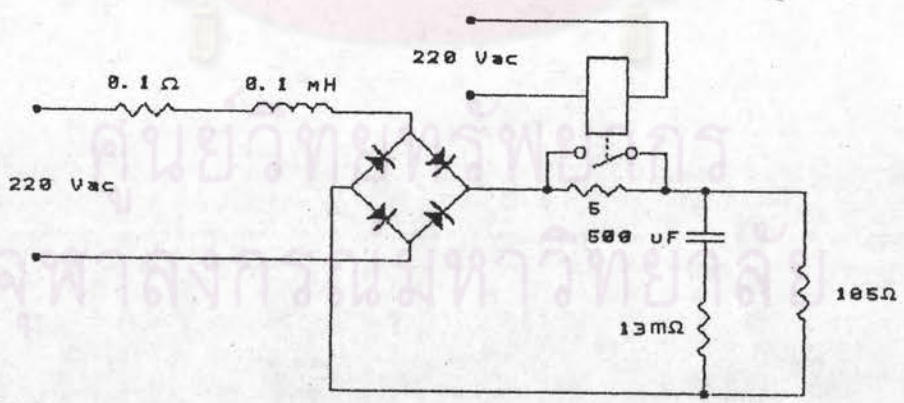


แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ (โวลต์)

กระแสในไดโอด (แอมแปร์)



รูปที่ 3.10 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสสลับขาเข้า เมื่อแรงดันไฟสลับขาเข้าเป็นโคไซน์



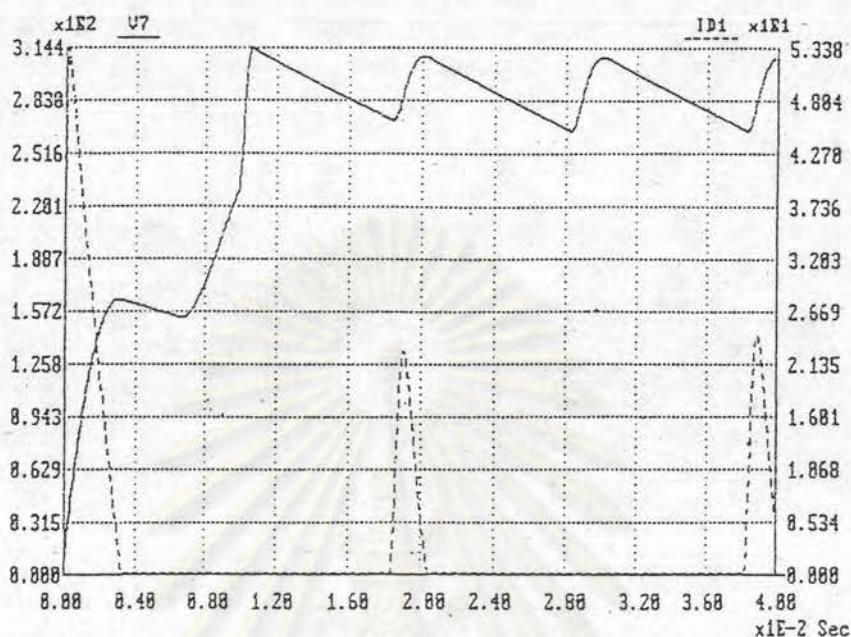
รูปที่ 3.11 วงจรที่ใช้ในการช้มเลตตอนเริ่มทำงาน

รูปที่ 3.12 จะเห็นได้ว่า ค่ายอดของกระแสไดโอดจะลดลงเหลือประมาณ 54 แอมแปร์ ซึ่งไดโอดที่ออกแบบไว้สามารถทนได้



กระแสในไดโอด (แอมแปร์)

แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ (โวลต์)



รูปที่ 3.12 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสไดโอดตอนเปิดเครื่อง  
เมื่อมีรีเลย์ป้องกันกระแสกระชาก

การคำนวณหาค่าความต้านทานที่ใช้ในการคายประจุ ตามมาตรฐานของ วสท. 408 กำหนดให้ตัวเก็บประจุที่ใช้กับแรงดันไม่เกิน 600 โวลต์ จะต้องมีความต้านทานต่ออยู่เพื่อช่วยให้ตัวเก็บประจุคายประจุให้แรงดันลดลงเหลือ 50 โวลต์ ภายใน 1 นาที ดังนั้นความต้านทานในการคายประจุ หาได้จากสมการ (3.4)

$$50 = 1.1 \times 310 \times \exp(-60/R_1 C) \quad (3.4)$$

ดังนั้นความต้านทาน  $R_1$  ประมาณเท่ากับ 63 k $\Omega$  และกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในความต้านทาน  $R_1$  เท่ากับ 1.53 วัตต์ หรือ 0.25 เพอร์เซ็นต์ ความต้านทานที่ใช้ 63 k $\Omega$  2 วัตต์

3.2.3 การออกแบบหม้อแปลง หม้อแปลงความถี่สูง ที่ใช้ลดระดับแรงดันในวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ต้องออกแบบให้สามารถจ่ายกำลังออกได้ตามต้องการ มีพิกัดแรงดันออก 30 โวลต์ กระแสออก 20 แอมแปร์ โดยที่ภาวะไม่มีโหลด ( $V_{no}$ ) แรงดันขาออกจะมีค่าสูงกว่าพิกัดแรงดันขาออก เพราะแรงดันตกคร่อมความต้านทานไม่มี โดยประมาณที่ภาวะวงรอบเปิด การคงค่าแรงดันของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ประมาณ 10% ดังนั้นในภาวะไม่มีโหลดจะมีแรงดันประมาณ 33 โวลต์ และข้อกำหนดของวงจรบริดจ์แบบไม่สมมาตร คือ วัฏจักรงานไม่เกิน 0.5 จะกำหนดให้วัฏจักรงานสูงสุด ( $D_{max}$ ) เท่ากับ 0.45 มีผลให้

แรงดันต่ำสุดของแหล่งจ่ายกำลัง ( $V_{sm\min}$ ) ที่หม้อแปลงลดระดับแรงดันลงสามารถจ่ายให้แรงดันขาออกได้ 30 โวลต์ และกระแสออก 20 แอมแปร์ มีค่าตามสมการ (3.5)

$$V_{sm\min} = V_{no}/D_{\max} = 33/0.45 = 73.3 \text{ โวลต์} \quad (3.5)$$

แรงดันต่ำสุดของแหล่งจ่ายกำลัง ( $V_{sm\min}$ ) ที่หม้อแปลงลดระดับแรงดันลงมานั้น ขึ้นกับค่าแรงดันไฟตรงต่ำสุดของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้า โดยค่าต่ำสุดของแรงดันไฟตรงที่ผ่านวงจรเรียงกระแส และวงจรกรอง เมื่อแรงดันไฟตรงต่ำสุด ไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้าที่พิกัด (220 โวลต์) เท่ากับ 265 โวลต์ และเมื่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้ามีค่า (220 โวลต์ - 10%) ซึ่งมีแรงดันไฟตรงต่ำสุด ( $V_{p\min}$ ) ที่ผ่านวงจรเรียงกระแส และวงจรกรองจะมีค่า 240 โวลต์ เพื่อให้แรงดันที่ภาวะไม่มีโหลด ( $V_{no}$ ) มีค่า 33 โวลต์ ดังนั้นอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลง ( $n$ ) จะมีค่าตามสมการ (3.6)

$$n = N_p/N_s = V_{p\min}/V_{sm\min} = 240/73.3 = 3.27 \quad (3.6)$$

โดยจะให้อัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงเท่ากับ 3

การออกแบบหม้อแปลงนี้จะใช้หลักการของ Kg Approach [Middlebrook and Cuk, 1986] ตามสมการ (3.7)

$$k_g/k = (\rho_{cu} \cdot P^2)/(k \cdot B_m^2 \cdot f^2 \cdot P_{cu}) \quad (3.7)$$

- โดย  $\rho_{cu}$  คือ ค่าความนำของทองแดง มีค่าเท่ากับ  $1.724 \times 10^{-8} \Omega m$   
 $P$  คือ กำลังที่แกนสามารถจ่ายได้ (ผลคูณของแรงดันและกระแสที่หม้อแปลงจ่าย)  
 $k$  คือ Utility factor ซึ่งมีค่าประมาณ 0.3-0.6  
 $B_m$  คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุด  
 $f$  คือ ความถี่ที่ใช้งาน  
 $P_{cu}$  คือ กำลังสูญเสียในเส้นลวด

การออกแบบจะให้ ความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุดเท่ากับ 0.26 เทสลา ความถี่ที่ใช้งานประมาณ 45 กิโลเฮิรตซ์ ค่า utility factor เท่ากับ 0.35 และกำลังสูญเสียในเส้นลวดเท่ากับ 4.5 วัตต์



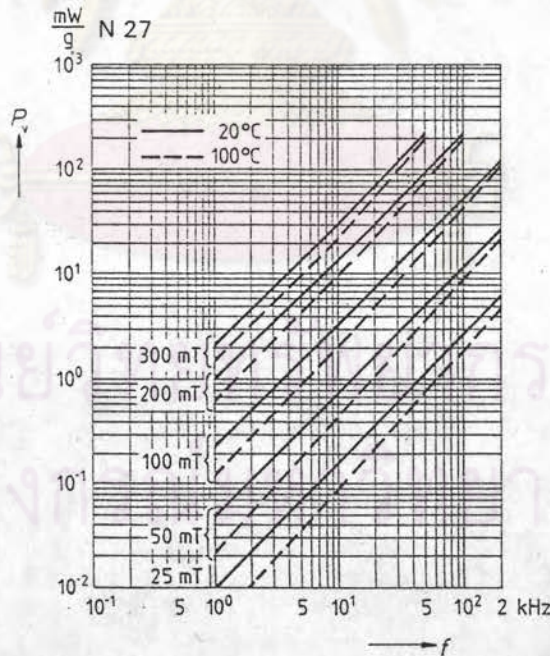
ส่วน P จะคิดกรณีที่เลวร้ายที่สุด คือ กรณีที่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้าเท่ากับ 220 โวลต์ +10% ซึ่งมีค่าเฉลี่ยไฟตรงเท่ากับ 325 โวลต์ ส่วนกระแสที่ไหลผ่านหม้อแปลง คือ กระแสสวิตช์ ที่ภาวะกระแสออกเท่ากับ 20 แอมแปร์ มีค่ายอดของกระแสขาเข้าหม้อแปลงเท่ากับ 6.67 แอมแปร์ ค่าอาร์เอ็มเอสประมาณ 5 แอมแปร์ ดังนั้น P หาได้ตามสมการ (3.8)

$$P = 325 \times 5 = 1625 \text{ โวลต์แอมแปร์} \quad (3.8)$$

แทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ (3.7) จะได้

$$k_g/k = 2.17 \times 10^{-10} \text{ m}^5$$

แกนเฟอร์ไรต์ EC-70 [Siemens, 1986] มีค่า  $k_g/k = 2.3 \times 10^{-10} \text{ m}^5$  แกนจะเป็นชนิด N27 จากกราฟความถี่กับกำลังสูญเสียในแกนต่อน้ำหนักแกน ในรูปที่ 3.13 จะเห็นได้ว่าที่ความถี่ประมาณ 50 กิโลเฮิรตซ์ และ  $B_{max}$  มีค่าเท่ากับ 0.13 เทสลา [Siemens, 1986] มีกำลังสูญเสียเท่ากับ 36.5 mW/g และแกน EC-70 มีน้ำหนัก 126 g [Siemens, 1986] มีกำลังสูญเสียในแกนประมาณ 4.6 วัตต์ ดังนั้น กำลังสูญเสียทั้งหมด ซึ่งประกอบด้วย กำลังสูญเสียในแกน และกำลังสูญเสียในเส้นลวด มีค่าประมาณ 9 วัตต์ หม้อแปลงมีประสิทธิภาพประมาณ 98%



รูปที่ 3.13 กราฟแสดงกำลังสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์ต่อน้ำหนัก กับความถี่

การคำนวณหาจำนวนรอบการพัน สามารถหาได้จากสมการ (3.9)

$$N_p = (V_p \cdot D_{max}) / (B_m \cdot S \cdot f) \quad (3.9)$$



โดยที่  $N_p$  คือ จำนวนรอบด้านปฐมภูมิ  
 $V_p$  คือ แรงดันขาเข้าด้านปฐมภูมิ  
 $S$  คือ พื้นที่หน้าตัดของแกน ในที่นี้แกน EC-70 มีค่าเท่ากับ  $222 \times 10^{-6} \text{ m}^2$   
 [Siemens, 1986]

จะคิดกรณีที่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้าเท่ากับ 220 โวลต์ -10% มีแรงดันไฟตรงต่ำสุดที่ผ่านวงจรเรียงกระแส และวงจรกรองเท่ากับ 240 โวลต์ วัฏจักรงานสูงสุด ( $D_{max}$ ) เท่ากับ 0.45 และความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุด ( $B_m$ ) เท่ากับ 0.26 เทสลา แทนค่าต่าง ๆ ในสมการ (3.6) และ (3.9) ได้  $N_p$  เท่ากับ 45 รอบ และ  $N_s$  เท่ากับ 15 รอบ การทำงานที่ความถี่สูง ลวดที่ใช้พันหม้อแปลงนั้นต้องคำนึงถึง skin depth ( $\delta_{cu}$ ) [Hayt, 1985] มีค่าตามสมการ (3.10)

$$\delta_{cu} = 0.0661/\sqrt{f} \quad \text{mm} \quad (3.10)$$

ความถี่การทำงานประมาณ 45 กิโลเฮิรตซ์ ค่า  $\delta_{cu}$  เท่ากับ 0.311 mm ดังนั้นจะใช้ลวด SWG # 36 มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.193 mm และพื้นที่หน้าตัดลวดเท่ากับ 0.029227  $\text{mm}^2$  โดยพื้นที่หน้าตัดลวดที่พันหม้อแปลงด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิหาได้ตามสมการ (3.11) และ (3.12) ตามลำดับ

$$A_{wp} = (0.35 \times W)/(2 \times N_p) \quad (3.11)$$

$$= 1.82 \quad \text{mm}^2$$

$$A_{ws} = (0.35 \times W)/(2 \times N_s) \quad (3.12)$$

$$= 5.47 \quad \text{mm}^2$$

โดยที่  $W$  คือ window area ของบอบนของแกน EC-70 มีค่าเท่ากับ 469  $\text{mm}^2$   
 [Siemens, 1986]

ดังนั้นจะใช้ลวด SWG # 36 จำนวน 60 เส้น และ 185 เส้น พันหม้อแปลงด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิตามลำดับ

3.2.4 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง การออกแบบตัวเหนี่ยวนำจะใช้หลักการ Kg Approach [Middlebrook and Cuk, 1986] โดยให้การกระเพื่อมของกระแสจากขอดถึงขอด ( $\Delta I_L$ ) เท่ากับ 20% ของกระแสออก มีวัฏจักรสูงสุด ( $D_{max}$ ) เท่ากับ 0.45 ค่าตัวเหนี่ยวนำสามารถหาได้จากสมการ (3.13)

$$L = [(1-D) \times V_o]/[\Delta I_L \times f] \quad (3.13)$$

แทนค่าต่าง ๆ ในสมการ (3.13) ตัวเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ 91 ไมโครเฮนรี่ ดังนั้นจะใช้ตัวเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ 100 ไมโครเฮนรี่ สำหรับวงจรกรอง



หลักการของ Kg approach ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าตามสมการ (3.14)

$$k_g/k = (L^2 I_{rms}^2 I_{peak}^2) / (k B_m^2 P_{cu}) \quad (3.14)$$

โดยที่	$\Delta I_L$	=	$0.2 \times 20$	=	4	แอมแปร์
	$I_{peak}$	=	$I_o + \Delta I_L / 2$	=	22	แอมแปร์
	$I_{rms}$	=	20.03			แอมแปร์
	k	=	0.4			
	$B_m$	=	0.3			เทสลา
	$P_{cu}$	=	4			วัตต์

แทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ (3.14) ได้  $k_g/k = 2.32 \times 10^{-10} \text{ m}^5$  ซึ่งจะ  
ใช้แกนเฟอร์ไรต์ EC-70 ในการพันตัวเหนี่ยวนำโดยหาจำนวนรอบที่พันได้จากสมการ (3.15)

$$N = (L \cdot I_{peak}) / (B_m \cdot S) \quad (3.15)$$

แทนค่าลงในสมการ (3.15) จะได้จำนวนรอบการพันเท่ากับ 34 รอบ ส่วนพื้นที่  
หน้าตัดของลวดที่ใช้พันตัวเหนี่ยวนำได้ตามสมการ (3.16)

$$A_w = (k \cdot W) / N \quad (3.16)$$

จะได้  $A_w$  เท่ากับ  $5.52 \text{ mm}^2$  โดยใช้ลวด SWG # 36 จำนวน 189 เส้น

3.2.5 การออกแบบตัวเก็บประจุของวงจรกรอง การออกแบบค่าเก็บประจุของ  
วงจรกรอง ขึ้นกับการกระเพื่อมของแรงดันออก ( $\Delta V_o$ ) การกระเพื่อมของกระแสในตัว  
เหนี่ยวนำ ( $\Delta I_L$ ) และความถี่การทำงาน (f) ตามสมการ (3.17)

$$C = \Delta I_L / (8 \times \Delta V_o \times f) \quad (3.17)$$

จะกำหนดให้การกระเพื่อมของแรงดันออก มีค่าขอดีถึงยอดเท่ากับ 1% ของแรงดัน  
ขาออก จากสมการ (3.17) จะได้ค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ  $33 \mu\text{F}$  เพื่อใช้ในการชั้มเลตด้วย  
คอมพิวเตอรื แต่โดยทั่วไปตัวเก็บประจุที่มีค่าใหญ่ ๆ นั้น ส่วนมากจะเป็นตัวเก็บประจุแบบ  
อิเล็กโทรไลต์ ซึ่งมีความต้านทานสมมูล (ESR) ค่อนข้างสูงจนกรมอยู่ ดังนั้น ค่าเก็บประจุ  
จะมีค่าลดลงเมื่อใช้งานที่ความถี่สูง จึงใช้ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโทรไลต์ ที่มีค่ามากกว่าที่ได้  
จากการคำนวณ โดยนำตัวเก็บประจุมาขนานกันเพื่อลดผลของ ESR ลง และเพื่อปรับปรุง  
ลักษณะของวงจรกรองสำหรับใช้งานที่ความถี่สูง จะใช้ตัวเก็บประจุแบบ multilayer  
plastic-film ค่าเล็ก ๆ มาขนานกับตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโทรไลต์ โดยจะใช้ตัวเก็บ  
ประจุแบบอิเล็กโทรไลต์  $330 \mu\text{F}$  2 ตัวขนานกัน และขนานกับตัวเก็บประจุแบบ multilayer  
plastic-film  $0.68 \mu\text{F}$



3.2.6 การหาขนาดของสวิตช์และไดโอดในวงจรกำลัง จากค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการออกแบบในหัวข้อ 3.2.1 ถึง 3.2.5 นำมาช้โมเลตโดยโปรแกรม LEC [เอกชัย ลีลาธรรม, 2530] มีวงจรกำลังตามรูปที่ 3.2 และการควบคุมเป็นแบบ current programmed mode จะได้ผลการช้โมเลตตามรูปที่ 3.14 ถึง 3.17

รูปที่ 3.14 แสดงรูปคลื่นกระแสในสวิตช์กำลัง โดยจะใช้เป็น POWER MOSFETs เนื่องจากความถี่การทำงานมีค่าสูงประมาณ 45 กิโลเฮิรตซ์ จะเห็นได้ว่ากระแสขอดในสวิตช์กำลัง  $S_1$  และ  $S_2$  มีค่า 7.5 แอมแปร์ ดังนั้นเลือก POWER MOSFETs มีพิกัดกระแส 12 แอมแปร์ เป็นการเผื่อไว้ 1.6 เท่า ทนแรงดันได้ 450 โวลต์ รูปที่ 3.15 แสดงรูปคลื่นกระแสในไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$  ซึ่งทำหน้าที่รีเซตกระแสทำแม่เหล็กในหม้อแปลงให้มีค่าเป็นศูนย์ก่อนที่สวิตช์นำกระแสในคาบถัดไป จะเห็นได้ว่ากระแสที่ไหลในไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$  นั้นมีลักษณะเป็นพัลส์แคบ ๆ มีค่าขอดกระแสเท่ากับ 7.4 แอมแปร์ โดยปกติไดโอดทั่วไปสามารถทนกระแสขอดได้ 3 ถึง 10 เท่าของพิกัดกระแส ดังนั้นเลือกไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$  เป็นแบบ fast recovery มีพิกัดกระแส 3 แอมแปร์ ทนแรงดันได้ 600 โวลต์

รูปที่ 3.16 และรูปที่ 3.17 แสดงรูปคลื่นกระแสของไดโอดเรียงกระแสด้านออก ( $D_3$ ) และไดโอด freewheeling ( $D_4$ ) เพราะว่าค่าขอดกระแสของไดโอดทั้งสองมีค่าเท่ากับค่าขอดกระแสในตัวเหนี่ยวนำเสมอ ดังนั้นค่าขอดกระแสของไดโอดทั้งสองมีค่าจำกัดที่ 22 แอมแปร์

ค่ากระแสอาร์เอ็มเอสของไดโอดทั้งสอง จะขึ้นอยู่กับวัฏจักรงาน (D) ของสวิตช์กำลัง และค่ากระแสขาออกของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ( $I_o$ ) ดังสมการ (3.18) และ (3.19)

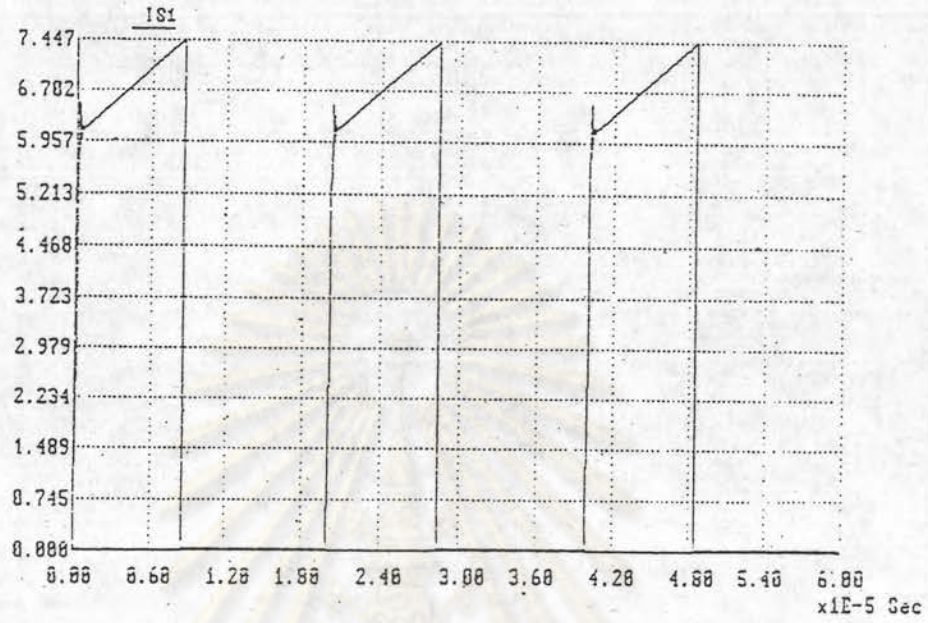
$$I_{D3} = \sqrt{D} \cdot I_o \quad (3.18)$$

$$I_{D4} = \sqrt{(1-D)} \cdot I_o \quad (3.19)$$

โดยทั่วไปวัฏจักรงานจะปรับค่าได้ระหว่าง 0 ถึง 0.5 ซึ่งค่าสูงสุดของกระแสอาร์เอ็มเอสของไดโอด  $D_3$  และ  $D_4$  มีค่าประมาณ 14 และ 20 แอมแปร์ ตามลำดับ ดังนั้นเลือกไดโอดทั้งสองเป็นแบบ fast recovery มีพิกัดกระแส 30 แอมแปร์ ทนแรงดัน 200 โวลต์

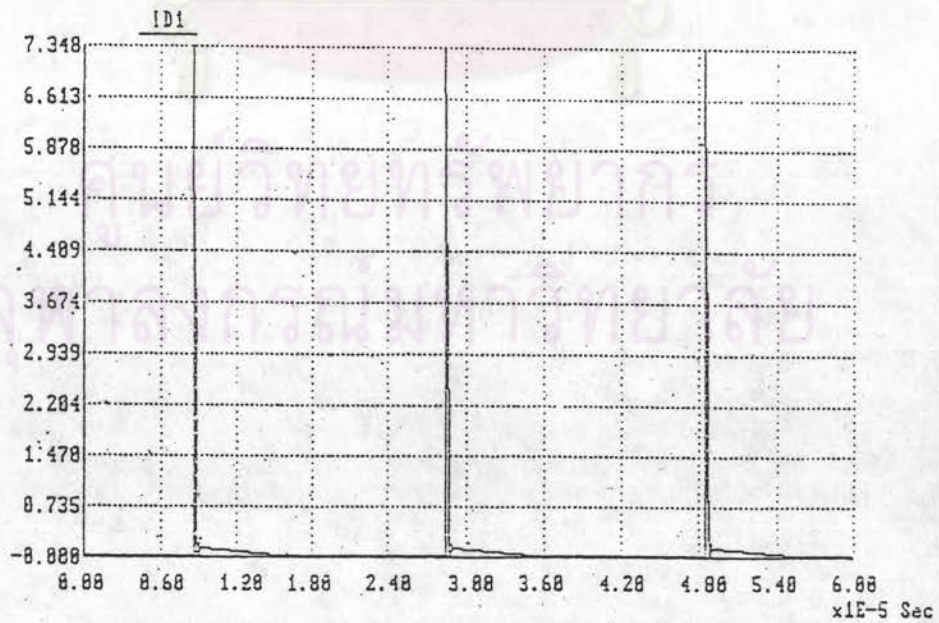


กระแสในสวิตช์ (แอมแปร์)



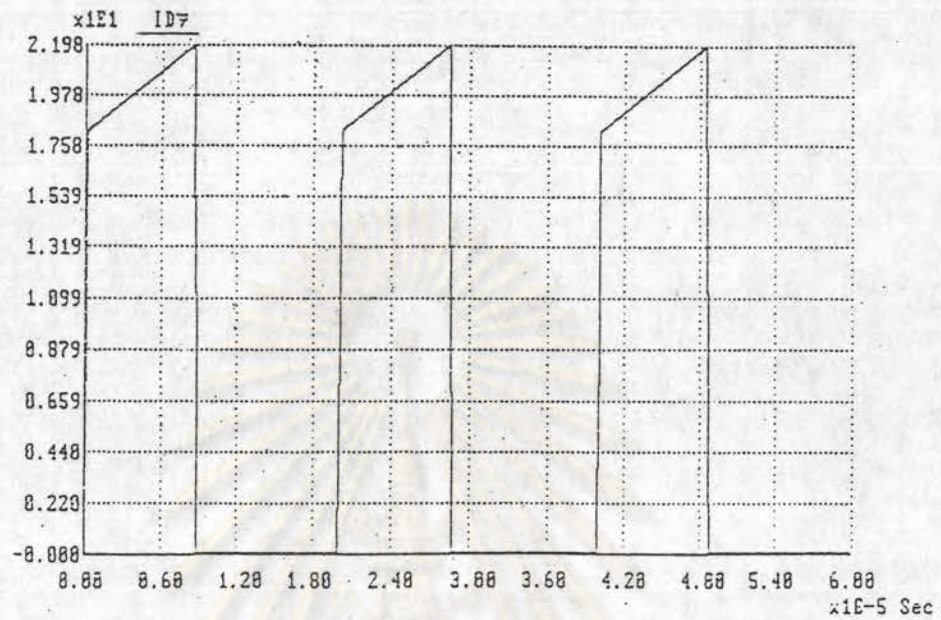
รูปที่ 3.14 กระแสในสวิตช์กำลัง

กระแสในไดโอด (แอมแปร์)



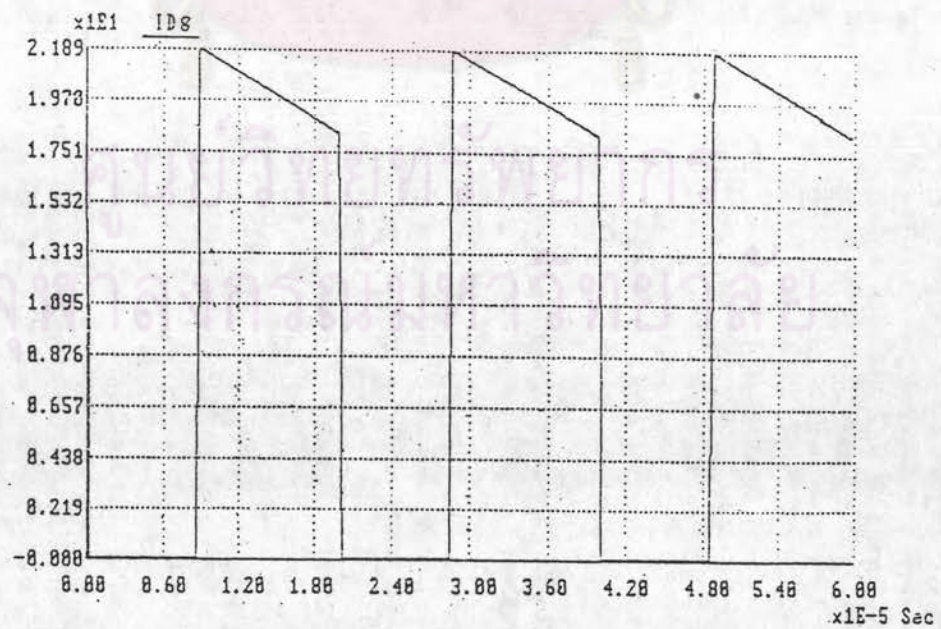
รูปที่ 3.15 กระแสในไดโอด D<sub>1</sub> และ D<sub>2</sub>

กระแสในไดโอด (แอมป์)



รูปที่ 3.16 กระแสไดโอดเรียงกระแสต้านออก  $D_3$

กระแสในไดโอด (แอมป์)



รูปที่ 3.17 กระแสในไดโอด freewheeling  $D_4$



3.2.7 การกำหนดค่าอัตราขยายของอุปกรณ์วัดกระแส การควบคุมกระแสในตัวเหนี่ยวนำของชุดวงจร จะใช้แรงดันขนาด 0 ถึง 10 โวลต์ เป็นสัญญาณคำสั่งกระแสของค่ายอดกระแสในตัวเหนี่ยวนำ 0 ถึง 22 แอมแปร์ ดังนั้นเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบกระแสในตัวเหนี่ยวนำกับสัญญาณคำสั่งกระแสของกระแสในตัวเหนี่ยวนำได้ จึงต้องมีอุปกรณ์วัดกระแสซึ่งทำหน้าที่ตรวจจับกระแสในตัวเหนี่ยวนำ และปรับแต่งให้เป็นสัญญาณชนิดเดียวกันกับสัญญาณคำสั่งกระแส เนื่องจากใช้แรงดัน 10 โวลต์ แทนค่ายอดกระแสในตัวเหนี่ยวนำ 22 แอมแปร์ ดังนั้นอัตราขยายของอุปกรณ์วัดกระแส จะต้องมีหน่วยเป็นความต้านทาน ( $R_f$ ) ซึ่งมีขนาดตามสมการ (3.20)

$$R_f = v_c / i_L = 10/22 = 0.45 \text{ โอห์ม} \quad (3.20)$$

อัตราขยายของอุปกรณ์วัดกระแส จะเป็นผลคูณของอัตราขยายของอุปกรณ์ตรวจจับกระแส กับอัตราขยายของวงจรขยายสัญญาณที่ใช้ในการขยายสัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจจับกระแส เพื่อใช้ในการป้อนกลับไปเปรียบเทียบกับสัญญาณคำสั่งกระแส อุปกรณ์ตรวจจับกระแสโดยทั่วไปจะเป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนกระแสให้เป็นแรงดัน ในการตรวจจับกระแสในตัวเหนี่ยวนำนี้ จะใช้ความต้านทานค่า 5 มิลลิโอห์ม เมื่อค่ายอดกระแสในตัวเหนี่ยวนำ 22 แอมแปร์ ไหลผ่านตัวต้านทานดังกล่าวจะมีแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานเท่ากับ 0.11 โวลต์ และมีกำลังสูญเสียเท่ากับ 2.2 วัตต์ เพื่อให้ได้แรงดันป้อนกลับ 10 โวลต์ เมื่อค่ายอดกระแสในตัวเหนี่ยวนำมีค่า 22 แอมแปร์ ต้องใช้วงจรขยายเท่ากับ 91 เพื่อขยายแรงดัน 0.11 โวลต์ ให้เป็นแรงดัน 10 โวลต์ เพื่อใช้ในการป้อนกลับ จะเห็นได้ว่าผลคูณของอัตราขยาย (91) และความต้านทาน 5 มิลลิโอห์ม มีค่าเท่ากับ 0.455 โอห์ม เท่ากับค่าของ  $R_f$  ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (3.20)

### 3.3 การออกแบบภาคควบคุมรวม

การออกแบบภาคควบคุมรวมนี้ เป็นการออกแบบวงจรคุมค่าของระบบการขนานวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ในที่นี้จะเป็นการคุมค่าแรงดันออก ซึ่งจะต้องทราบฟังก์ชันโอนย้ายสำหรับสัญญาณขนาดเล็กของชุดวงจร ถ้าชุดวงจรแต่ละชุดมีฟังก์ชันโอนย้ายเหมือนกัน สามารถใช้ฟังก์ชันโอนย้ายของชุดวงจรเพียงชุดเดียวมาใช้ในการออกแบบวงจรคุมค่าแรงดันของระบบได้

3.3.1 การคำนวณฟังก์ชันโอนย้ายสำหรับสัญญาณขนาดเล็กระหว่างสัญญาณควบคุมกระแส ( $\hat{v}_c$ ) กับสัญญาณออก ( $\hat{v}_o$ ) ในการออกแบบวงจรคุมค่าแรงดัน (voltage regulator) ของระบบที่ได้จากการขนานวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ให้ระบบรวมเสมือนเป็นเพียงแหล่งจ่ายเดียว ในเบื้องต้นจะใช้วงจรสมมูลแบบเชิงเส้น สำหรับสัญญาณขนาดเล็ก



ในการออกแบบ จากนั้นใช้คอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์การทำงานของระบบการขนานวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง เพื่อตรวจสอบการออกแบบอีกชั้นหนึ่ง ในการออกแบบฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรคุมค่าแรงดัน จะต้องทราบค่าฟังก์ชันโอนย้ายของแรงดันออก ( $\hat{v}_o$ ) ต่อสัญญาณควบคุมกระแส ( $\hat{v}_c$ ) ค่าฟังก์ชันโอนย้ายของระบบจะขึ้นอยู่กับความถี่การทำงานของสวิตช์ ( $f$ ) ขนาดของตัวเหนี่ยวนำ ( $L$ ) และตัวเก็บประจุ ( $C$ ) ของวงจรกรอง อัตราขยายของอุปกรณ์วัดกระแส ( $R_f$ ) และวัฏจักรงานของสวิตช์ ( $D$ ) จะเห็นได้ว่าทั้ง  $f$ ,  $L$ ,  $C$  และ  $R_f$  จะมีค่าคงที่ตามที่ได้ออกแบบไว้แล้ว ส่วนวัฏจักรงานของสวิตช์จะมีค่าแปรไปตามจุดทำงานของวงจร โดยจะคิดที่วัฏจักรงาน 0.365 ดังนั้นจะคงค่าของตัวแปรของวัฏจักรงาน  $D$  และ  $D'$  ไว้เมื่อแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ในสมการต่อไปนี้

จากสมการ (2.16) และ (2.29) จะได้

$$\begin{aligned} w_o &= (2.f)/(n.D) = (2.f)/(1+D) = (2 \times 45 \times 10^3)/(1+D) \\ &= (90 \times 10^3)/(1+D) \end{aligned} \quad (3.21)$$

จากสมการ 2.27 และ 3.21 จะได้

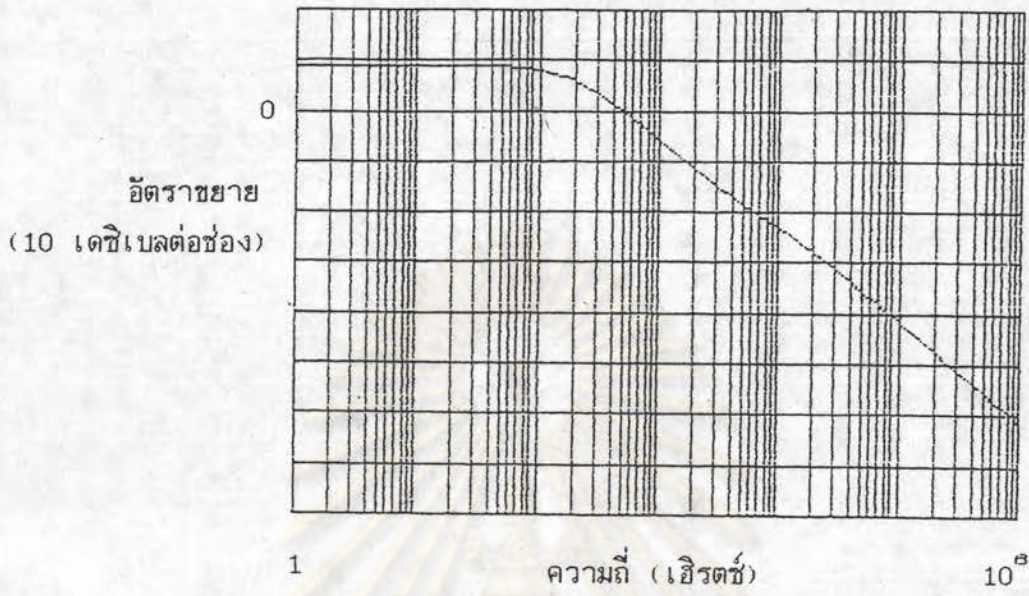
$$y_{2c} = \frac{-1}{0.45} \times \frac{1}{1+[s.(1+D)]/[90 \times 10^3]} \quad (3.22)$$

จากสมการ (2.16), (2.28), (2.29) และ (3.21) จะได้

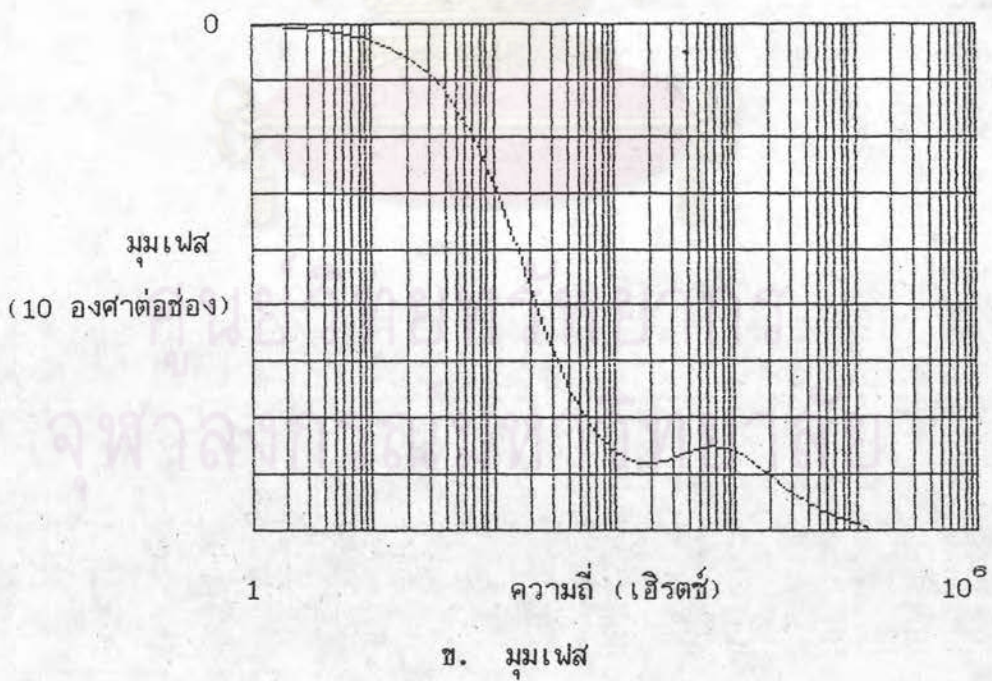
$$y_{2z} = \frac{(1-D)}{90 \times 10^3 \times 100 \times 10^{-6}} \times \frac{1}{1+[s.(1+D)]/[90 \times 10^3]} \quad (3.23)$$

จากสมการ (3.22) และ (3.23) และค่าตัวแปรต่าง ๆ ตามการออกแบบ จะได้ฟังก์ชันโอนย้ายของ ( $\hat{v}_o/\hat{v}_c$ ) จากนั้นใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Mathcad [Math CAD, 1987] คำนวณหาผลตอบทางความถี่ ( $\hat{v}_o/\hat{v}_c$ ) สำหรับวัฏจักรงานที่ 0.365 ซึ่งเป็นจุดที่เป็นการทำงาน จะได้ผลตามรูปที่ 3.18





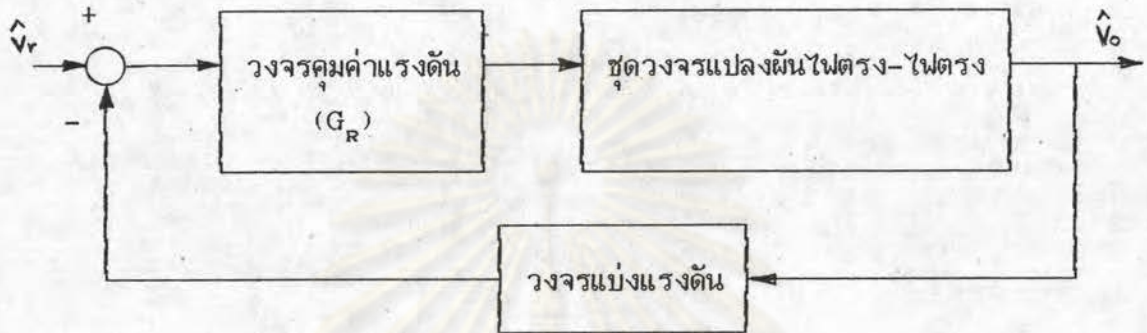
ก. อัตราขยาย



รูปที่ 3.18 ผลการคำนวณของผลตอบเชิงความถี่ ( $\hat{v}_o/\hat{v}_i$ )  
ที่วัฏจักรงาน 0.365



3.3.2 การออกแบบฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรมุมค่า วงจรมุมค่าจะเป็นอย่างไรขึ้นอยู่กับฟังก์ชันโอนย้ายสำหรับสัญญาณขนาดเล็ก ระหว่างตัวแปรที่ควบคุมกับสัญญาณแรงดันออก โดยมีผลตอบทางความถี่แสดงในรูปที่ 3.20 จากรูปที่ 3.1 สามารถเขียนบล็อกไดอะแกรมการควบคุมสำหรับสำหรับสัญญาณขนาดเล็ก ของระบบการขนานวงจรมุมค่าแรงดัน-ไฟตรง ได้ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมสำหรับสัญญาณขนาดเล็ก ของระบบการขนานวงจรมุมค่าแรงดัน-ไฟตรง

ระบบที่แสดงในรูปที่ 3.19 จะมีอัตราขยายรอบแรงดัน ( $T_v$ ) เป็นไปตามสมการ (3.24)

$$T_v = \hat{v}_o / \hat{v}_c \cdot \hat{v}_{os} / \hat{v}_o \cdot G_R \quad (3.24)$$

เมื่อ  $G_R$  คือ อัตราขยายของวงจรมุมค่าแรงดันออก

หลักการออกแบบ ให้ระบบที่มีการป้อนกลับทำงานอย่างมีเสถียรภาพ จะออกแบบให้อัตราขยาย  $T_v$  มีค่าน้อยกว่า 0 เดซิเบล เมื่อเฟสลาหลังเท่ากับ 180 องศา โดยให้  $T_v$  มีอัตราขยายไฟตรงที่สูง มี phase margin มากกว่า 45-60 องศา มี gain margin มากกว่า 10 เดซิเบล และมี crossover frequency มากเพียงพอ (ขึ้นกับความถี่ที่ต้องการ) [Middlebrook, 1989] จากสมการ (3.24) ค่า  $\hat{v}_o / \hat{v}_c$  แสดงอยู่ในรูปที่ 3.18 เทอม  $\hat{v}_{os} / \hat{v}_o$  เป็นอัตราขยายแรงดันของวงจรมุมค่าแรงดัน อัตราขยายแรงดันนั้นขึ้นอยู่กับค่าสูงสุดของแรงดันตั้งค่า ในรูปที่ 3.19 โดยทั่วไปแรงดันตั้งค่าจะมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 โวลต์ แต่ในที่นี้จะเลือกให้มีค่าแรงดันเท่ากับ 5.8 โวลต์ เพื่อให้แรงดันออกมีค่าเท่ากับ 30 โวลต์ ดังนั้น  $\hat{v}_{os} / \hat{v}_o$  จึงควรมีค่าเท่ากับ 0.19 สำหรับเทอมสุดท้ายซึ่งเป็นฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรมุมค่าแรงดัน จะต้องทำการเลือกชนิดของวงจรมุมค่าแรงดันออก และตำแหน่งของขั้ว (poles) และศูนย์ (zero) ให้เหมาะสม โดยจากรูปที่ 3.18 จะเห็นได้ว่ามีขั้วเด่น (dominant pole)  $p_{p1}$  ที่ความถี่ 188 เฮิรตซ์ และมีศูนย์ (zero)  $p_z$  กับขั้วที่สอง ( $2^{nd}$



pole)  $w_{pz}$  ที่ความถี่ 6.03 กิโลเฮิรตซ์ กับ 9.8 กิโลเฮิรตซ์ ตามลำดับ โดยสามารถละทิ้งขั้วที่สองได้ เพราะผลของศูนย์มีมากกว่า ดังนั้นระบบเสมือนมีขั้วเดียว ตามหลักการของวงจรมุมค่าแบบ PI ศูนย์ ( $w_{zr}$ ) นั้นจะวางที่ความถี่ 188 เฮิรตซ์ [โคทม อารียา, 2532] เพื่อหักล้างผลของขั้วเด่น (dominant pole) ดังนั้นฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรมุมค่าเป็นไปตามสมการ (3.25)

$$G_R(s) = [A.(1+s/w_{zr})]/[s/w_{zr}] \quad (3.25)$$

$$\text{โดยที่ } w_{zr} = w_{p1} = 2.\pi.f_{p1} \quad \text{เรเดียนต่อวินาที}$$

$$f_{p1} = 188 \quad \text{เฮิรตซ์}$$

ส่วนอัตราขยายไฟตรง (A) ของวงจรมุมค่า สามารถหาได้จาก crossover frequency ของอัตราขยายวงรอบของระบบ คือ แถบความถี่ของอัตราขยายวงรอบมีค่าสูงสุดเท่าที่เป็นไปได้ เพื่อให้แถบความถี่กว้างที่สุด ดังนั้นจึงเลือกใช้ crossover frequency ที่ทำให้มี phase margin มากกว่า 60 องศา โดยให้ crossover frequency ( $f_{cv}$ ) อยู่ที่ 4.5 กิโลเฮิรตซ์ ค่าอัตราขยายไฟตรง (A) ของวงจรมุมค่าแรงดันสามารถคำนวณหาได้ตามสมการ (3.26)

$$A(\text{db}) = 20 \log (f_{cv}/f_{p1}) - \hat{v}_o/\hat{v}_c(\text{db}) - \hat{v}_{os}/\hat{v}_o(\text{db}) \quad (3.26)$$

$$\text{โดยที่ } \hat{v}_o/\hat{v}_c(\text{db}) = \text{ค่าอัตราขยายของฟังก์ชันโอนย้ายของแรงดันออก (v_o)} \\ \text{ต่อสัญญาณควบคุมกระแส (v_c) มีค่าเท่ากับ 8.99 เดซิเบล}$$

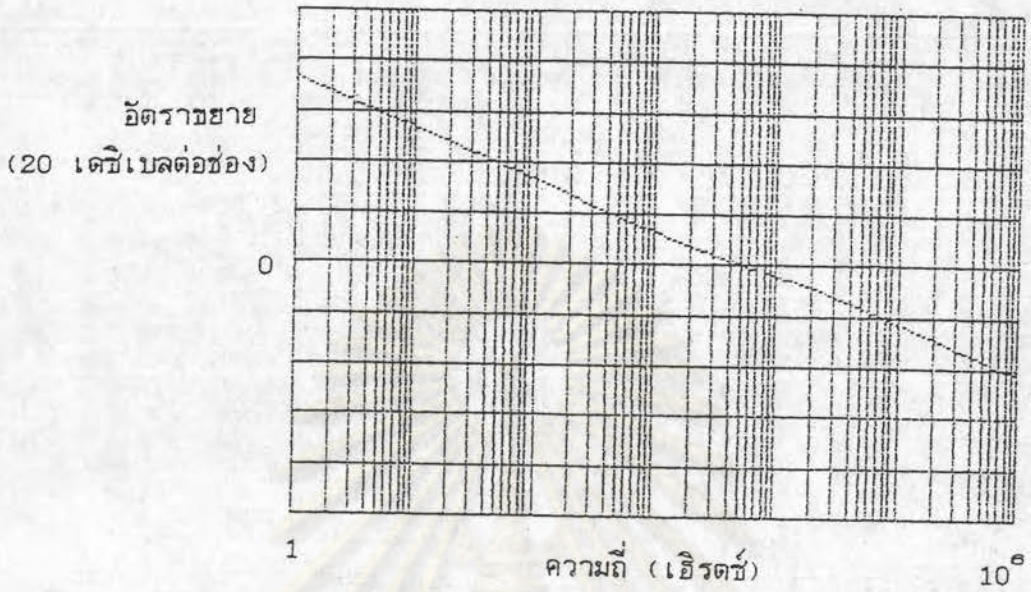
$$\hat{v}_{os}/\hat{v}_o(\text{db}) = \text{อัตราขยายของวงจรมุมค่าแรงดันออก มีค่าเท่ากับ} \\ -14.41 \text{ เดซิเบล}$$

จากสมการ (3.26) จะได้อัตราขยายไฟตรงของวงจรมุมค่าแรงดันเท่ากับ 33 เดซิเบล ดังนั้นจะได้ฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรมุมค่าแรงดันตามสมการ (3.27)

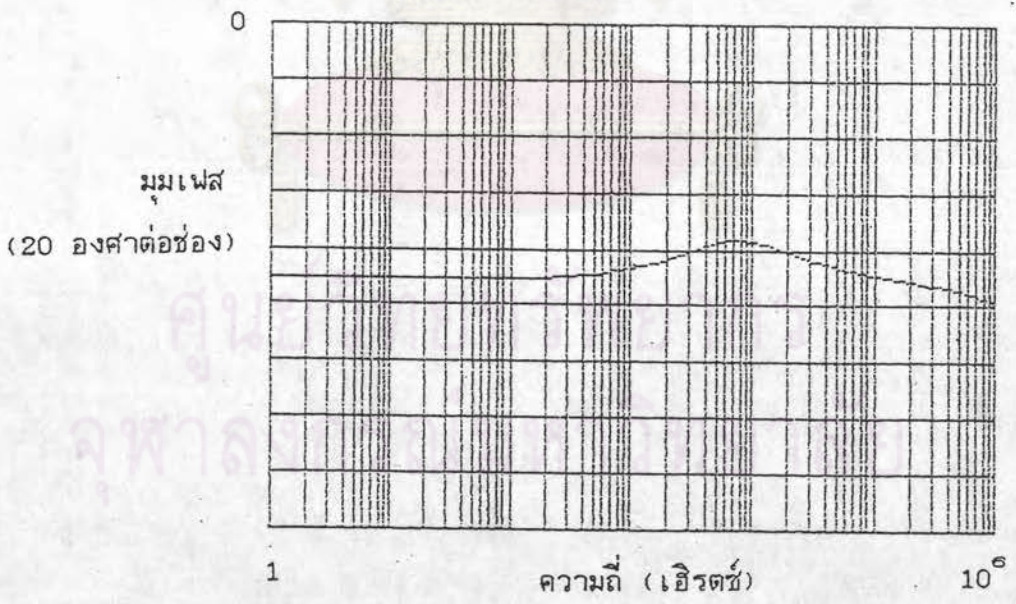
$$G_R(s) = \{44.7 \times [1 + (s/1181.24)]\} / (s/1181.24) \quad (3.27)$$

จากนั้นก็ทำการคำนวณผลตอบแทนทางความถี่ ของอัตราขยายวงรอบ (loop gain) โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Mathcad [Math CAD, 1987] ได้ผลการคำนวณผลตอบแทนความถี่ของอัตราขยายวงรอบ ( $T_v$ ) ตามสมการ (3.24) ดังรูปที่ 3.20 จะเห็นได้ว่าอัตราขยายวงรอบสามารถประมาณได้ว่า มีแต่อินทิกรัลเท่านั้น โดยมี crossover frequency ประมาณ 4.5 กิโลเฮิรตซ์ โดยมี phase margin ประมาณ 80 องศา ซึ่งมีค่ามากเพียงพอที่จะทำให้ระบบทำงานอย่างมีเสถียรภาพ ในการคำนวณหาแถบความถี่ของระบบการขนานเมื่อทำงานในภาคแรงดัน จะหาได้จากฟังก์ชันโอนย้ายของแรงดันออกต่อแรงดันตั้งค่าตามสมการ





ก. อัตราขยาย



ข. มุมเฟส

รูปที่ 3.20 อัตราขยายวงรอบเปิด ( $T_o$ ) ที่วัฏจักรงาน 0.365 เมื่อ  $G_R$  เป็นไปตามสมการ (3.27)



(3.28) เมื่อทำการคำนวณอัตราขยายวงรอบปิดโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Mathcad ได้ผลตอบทางความถี่ดังรูปที่ 3.21 จะเห็นได้ว่าระบบมีแถบความถี่ประมาณ 4.5 กิโลเฮิรตซ์

$$\hat{v}_o / \hat{v}_r = [(\hat{v}_o / \hat{v}_c) \cdot G_R] / [1 + (\hat{v}_o / \hat{v}_c) \cdot (\hat{v}_{os} / \hat{v}_o) \cdot G_R] \quad (3.28)$$

### 3.4 การจำลองการทำงานของระบบการขนานวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง

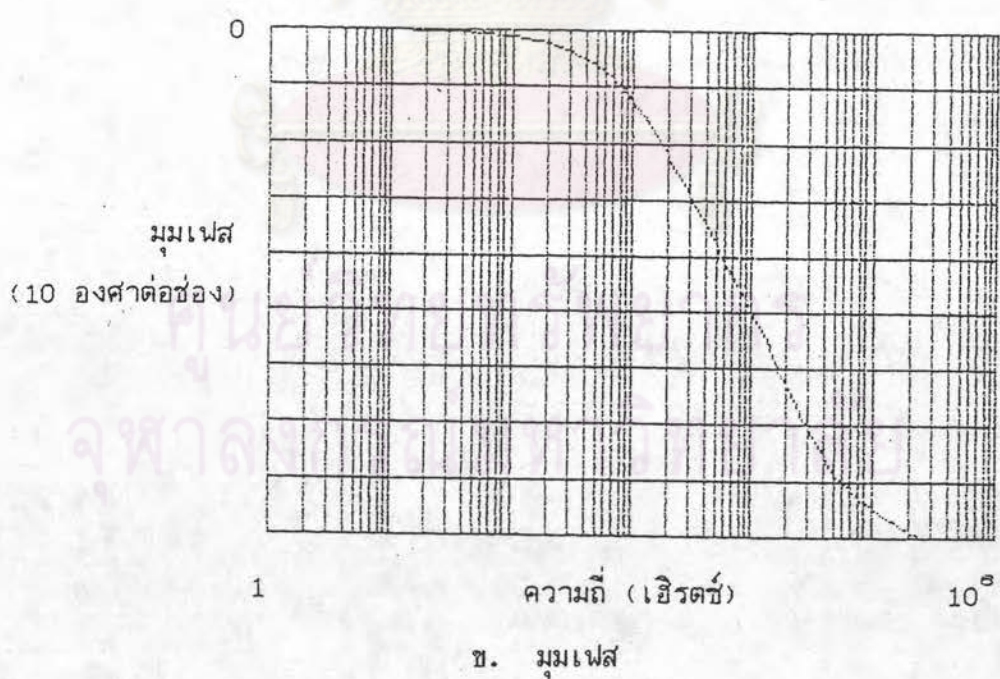
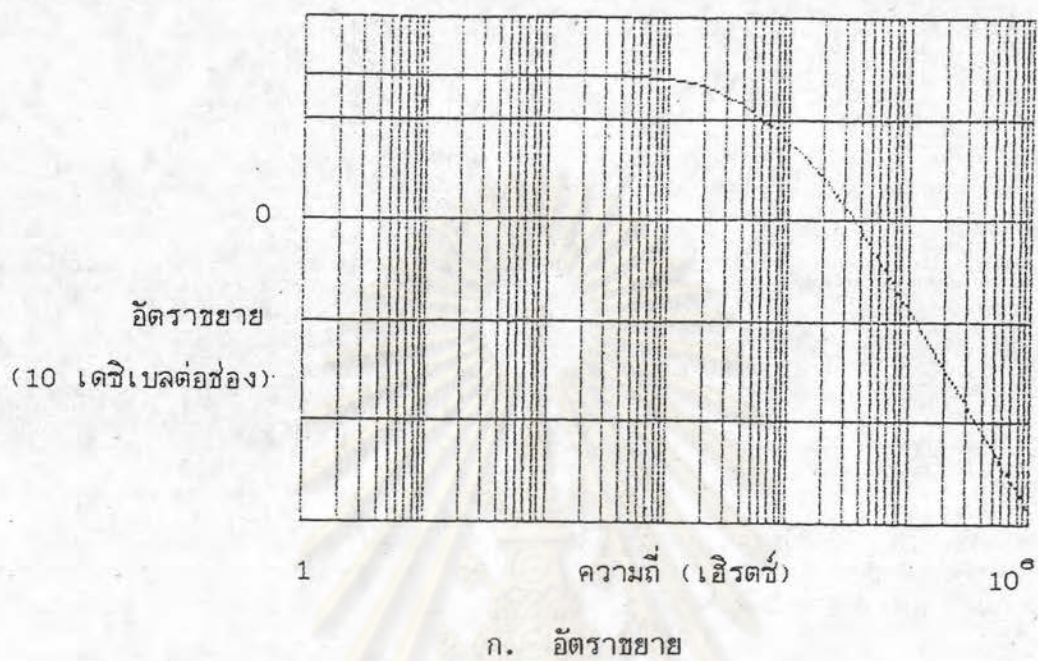
ในการออกแบบวงจรคุมค่า (regulator) ในหัวข้อ 3.3 นั้นได้ใช้วงจรสมมูลแบบเชิงเส้นสำหรับสัญญาณขนาดเล็กรอบ ๆ จุดทำงานสงบค่าต่าง ๆ กันเป็นแนวทางในการเลือกฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรคุมค่า เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพตลอดช่วงของกระแสออก และแรงดันออกของระบบการขนาน อย่างไรก็ตาม วงจรสมมูลดังกล่าวจะมีความถูกต้องสำหรับสำหรับสัญญาณหรือมีการเปลี่ยนแปลงที่มีขนาดเล็กเท่านั้น เพื่อให้ทราบถึงเสถียรภาพตลอดจนพฤติกรรมของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง และระบบการขนานวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง สำหรับสัญญาณหรือการเปลี่ยนแปลงที่มีขนาดใหญ่ จำเป็นต้องวิเคราะห์การทำงานของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง และระบบการขนานนั้นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถจำลองแบบการทำงานของวงจรไม่เชิงเส้น และมีสัญญาณขนาดใหญ่ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เลือกใช้ คือ โปรแกรม TUTSIM [TUTSIM, 1986] ซึ่งสามารถรับข้อมูลเป็นฟังก์ชันโอนย้ายแบบเชิงเส้น ทั้งอันดับที่หนึ่ง และอันดับที่สอง, วงจรบวก ลบ คูณ หาร, วงจรตรรก และฟังก์ชันแบบไม่เชิงเส้นได้ ดังนั้นจึงสามารถใส่ฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรคุมค่า (regulator), วงจรตรรก ตลอดจนการทำงานของสวิตช์ของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง เข้าไปได้โดยตรง ส่วนวงจรกรอง และภาระทางไฟฟ้าจะต้องเขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันโอนย้ายแบบเชิงเส้น หรือบล็อกไดอะแกรมเสียก่อนจึงจะสามารถป้อนเป็นข้อมูลให้กับคอมพิวเตอร์ได้ การจำลองการทำงานจะทำการจำลองวงจรที่มีบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 3.1 โดยมีข้อมูลที่ป้อนแก่โปรแกรม TUTSIM มีบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 3.23, 3.24 เมื่อให้ชุดวงจรทำงานในภาคกระแส และระบบที่ได้การขนานทำงานในภาคแรงดัน ตามลำดับ การเตรียมข้อมูลของส่วนประกอบที่สำคัญของชุดวงจร และระบบที่ได้จากการขนานสำหรับป้อนให้กับคอมพิวเตอร์จะทำได้ดังนี้

3.4.1 วงจรคุมค่า จะแทนวงจรคุมค่าด้วยฟังก์ชันโอนย้ายแบบเชิงเส้นของวงจรคุมค่าที่ได้ออกแบบไว้ โดยมีฟังก์ชันโอนย้ายตามสมการ (3.27)

3.4.2 วงจรกรอง LC แบบผ่านต่ำ สามารถหาฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรกรองแบบ LC ได้โดยง่าย ตามวงจรในรูปที่ 3.22 และสมการต่อไปนี้ คือ

$$i_L = (v_s - v_o) \cdot \frac{1}{(s \cdot L + R_L)} \quad (3.29)$$



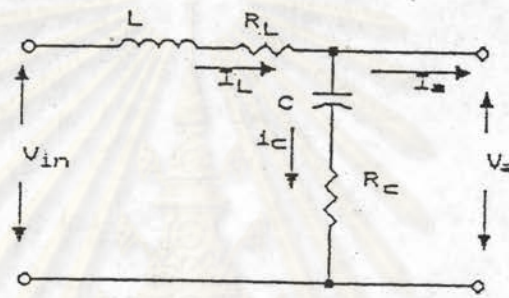


รูปที่ 3.21 อัตราขยายวงรอบปิด ที่วิญจักรงาน 0.365  
เมื่อ  $\hat{v}_o/\hat{v}_r$  เป็นไปตามสมการ (3.28)



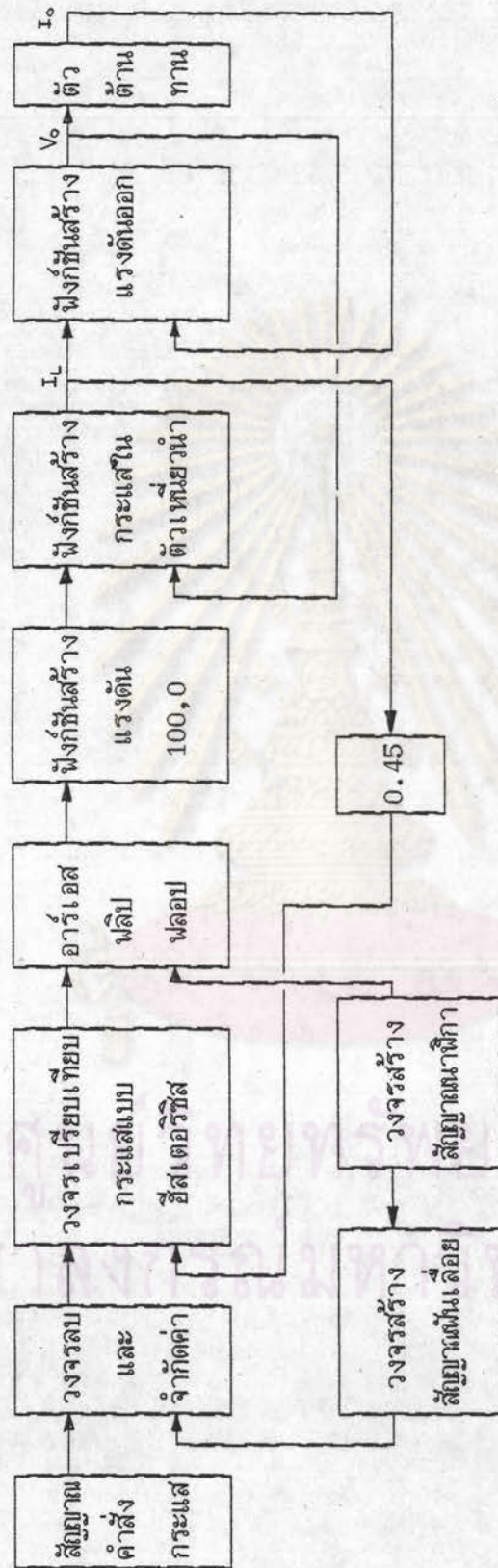
$$V_o = (i_L - i_o) \cdot \frac{(1 + s \cdot C \cdot R_c)}{(s \cdot C)} \quad (3.30)$$

โดยที่	$R_L$	=	5	มิลลิโอห์ม
	$L$	=	100	ไมโครเฮนรี
	$C$	=	33	ไมโครฟารัด
	$R_c$	=	0.5	มิลลิโอห์ม



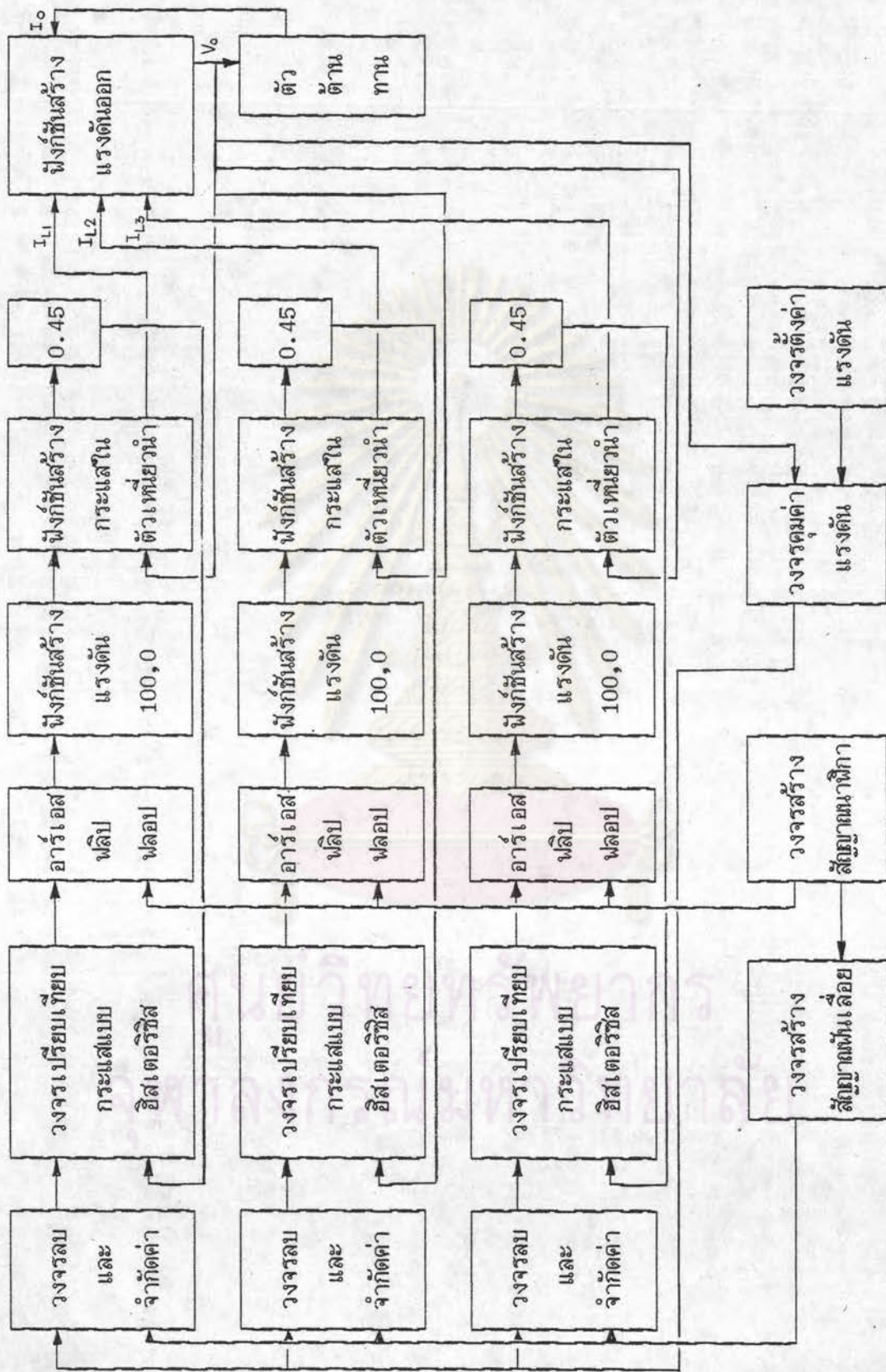
รูปที่ 3.22 วงจรกรอง LC แบบผ่านต่ำ

รูปที่ 3.23 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรที่ใช้ ในการจำลองการทำงานของ ชุดวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ที่ทำงานในโหมดกระแส ส่วนรูปที่ 3.24 แสดงบล็อก ไดอะแกรมของระบบการขนานวงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงานในโหมดแรงดัน ส่วน list โปรแกรมของวงจรทั้งสองแสดงอยู่ในภาคผนวก ก. ผลการจำลองการทำงานที่สภาวะต่าง ๆ ที่ได้ทำการวิเคราะห์ และนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ในบทที่ 5 ต่อไป ผลของ การจำลองการทำงานของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง และระบบการขนานรวมแปลงผัน ไฟตรง-ไฟตรง ในกรณีที่มีการเปลี่ยนสัญญาณอ้างอิง และโหลดแบบขึ้น โดยใช้โปรแกรม TUTSIM [TUTSIM, 1986] แสดงต่อในรูปที่ 3.26 ถึงรูปที่ 3.37

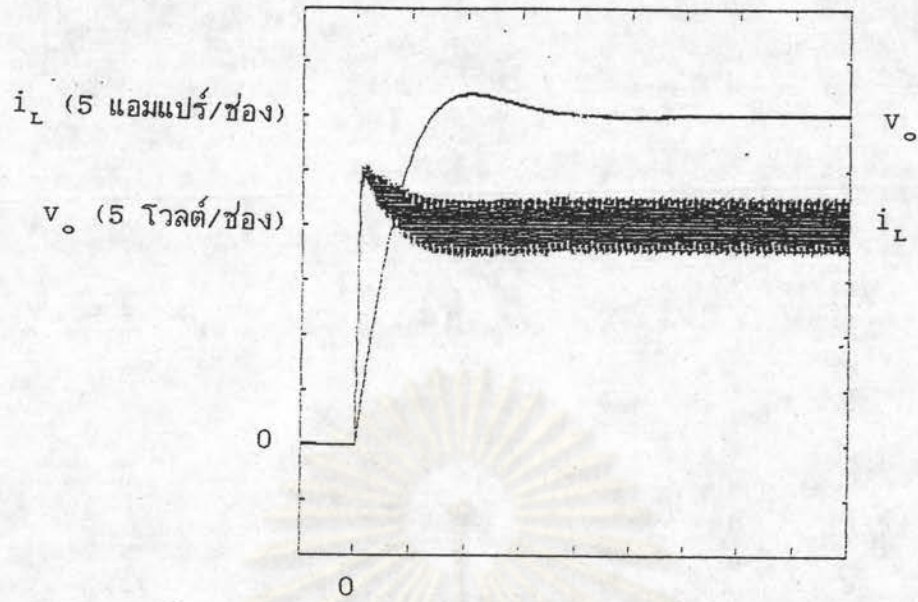


รูปที่ 3.23 บล็อกไดอะแกรมของวงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ที่ทำงานในโหมดกระแส



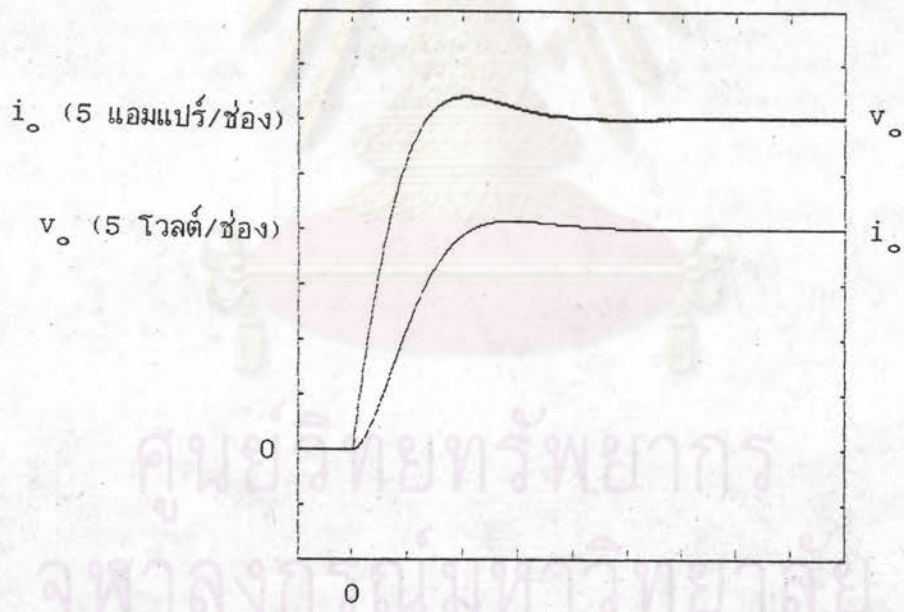


รูปที่ 3.24 บล็อกไดอะแกรมของระบบการขนานวงจรที่ใช้ในการจำลอง ที่ทำงานในภาคแรงดัน



สเกลเวลา 1 มิลลิวินาที/ช่อง

ก. รูปคลื่นแรงดันออก ( $v_o$ ) และกระแสในตัวเหนี่ยวนำ ( $i_L$ )

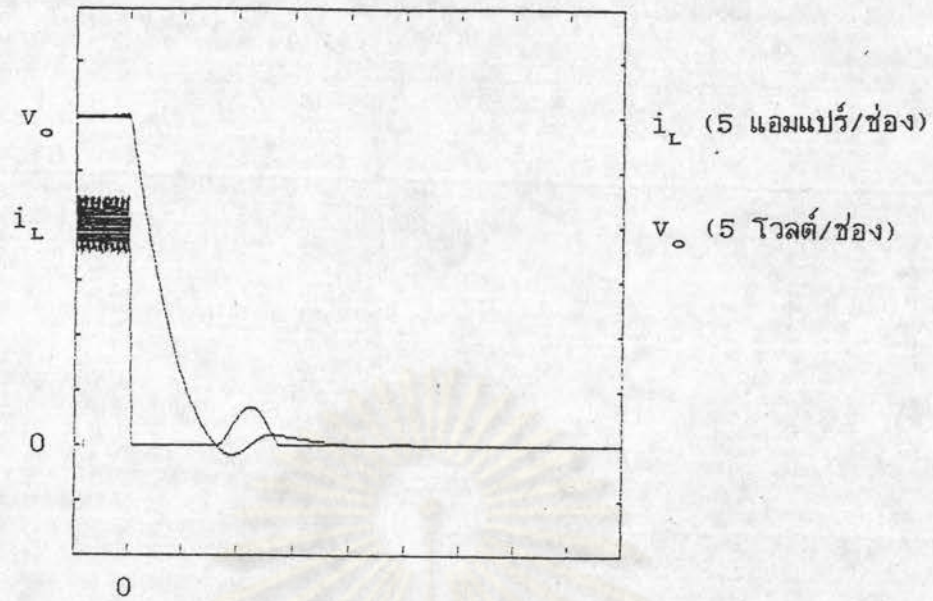


สเกลเวลา 1 มิลลิวินาที/ช่อง

ข. รูปคลื่นแรงดันออก ( $v_o$ ) และกระแสออก ( $i_o$ )

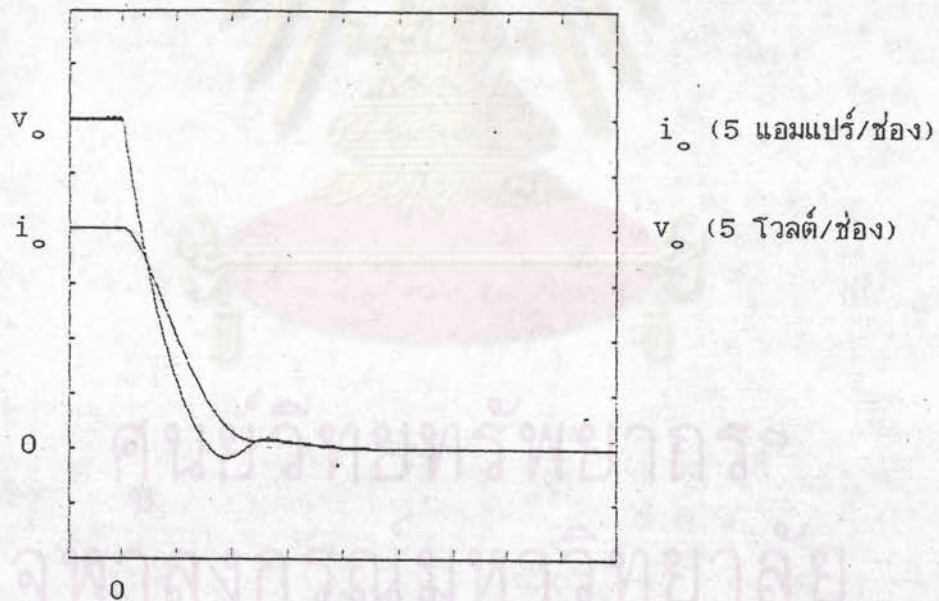
รูปที่ 3.25 ผลการจำลองการทำงานของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ด้วยคอมพิวเตอรื  
เมื่อทำงานในโหมดกระแส และได้รับแรงดันคำสั่งกระแสแบบขึ้น  
จาก 0 โวลต์ เป็น 10 โวลต์





สเกลเวลา 1 มิลลิวินาที/ช่อง

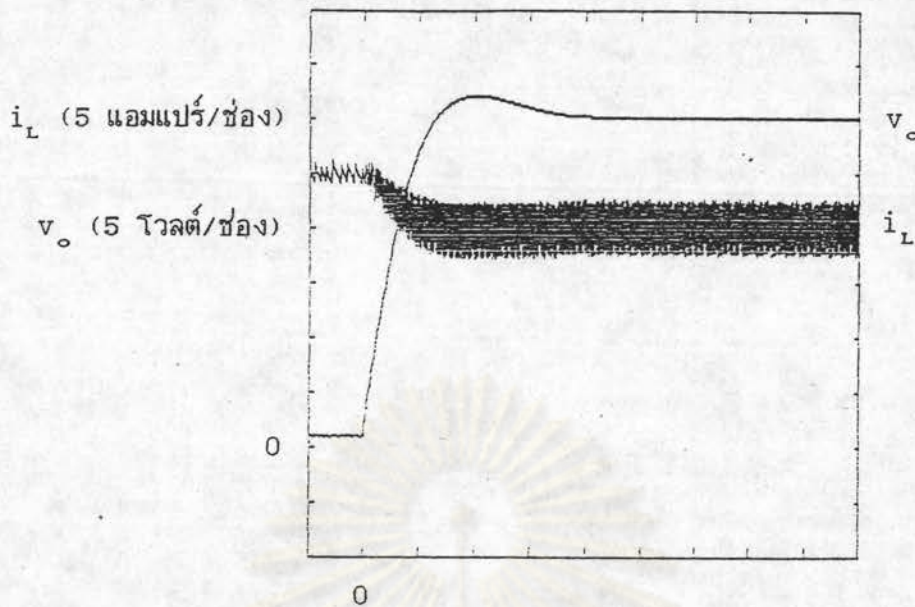
ก. รูปคลื่นแรงดันออก ( $v_o$ ) และกระแสในตัวเหนี่ยวนำ ( $i_L$ )



สเกลเวลา 1 มิลลิวินาที/ช่อง

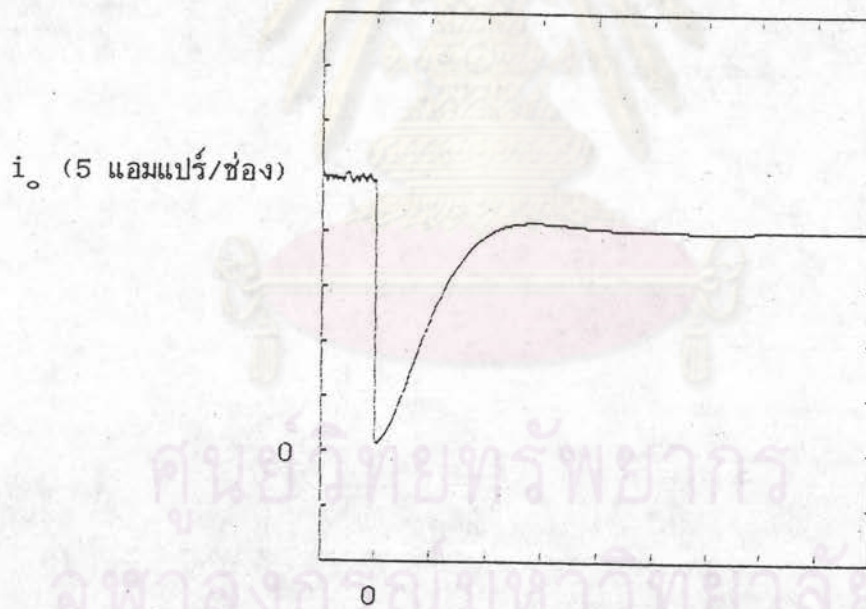
ข. รูปคลื่นแรงดันออก ( $v_o$ ) และกระแสออก ( $i_o$ )

รูปที่ 3.26 ผลการจำลองการทำงานของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ด้วยคอมพิวเตอรื  
 เมื่อทำงานในภาคกระแส และได้รับแรงดันคำสั่งกระแสแบบขึ้น  
 จาก 10 โวลต์ เป็น 0 โวลต์



สเกลเวลา 1 มิลลิวินาที/ช่อง

ก. รูปคลื่นแรงดันออก ( $v_o$ ) และกระแสในตัวเหนี่ยวนำ ( $i_L$ )

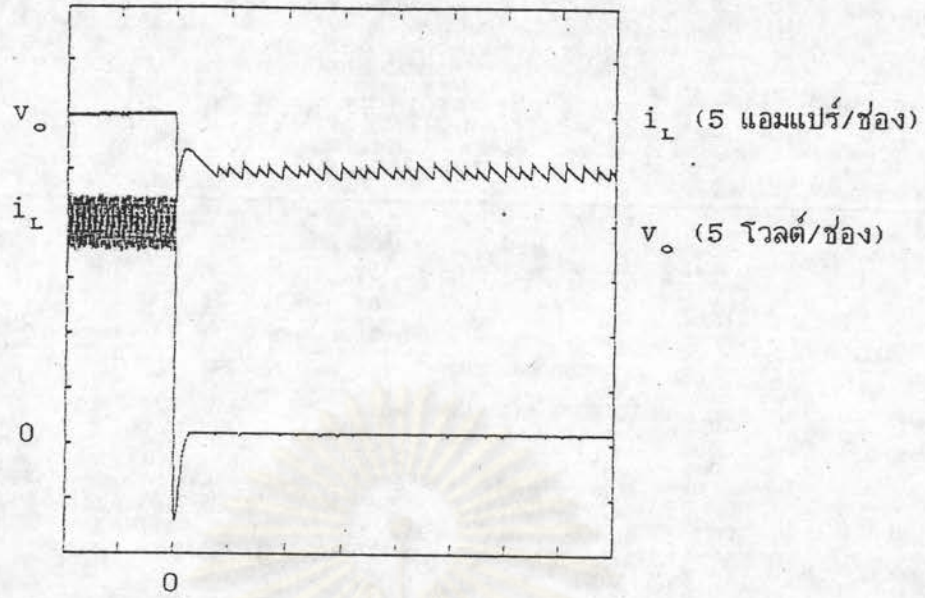


สเกลเวลา 1 มิลลิวินาที/ช่อง

ข. รูปคลื่นกระแสออก ( $i_o$ )

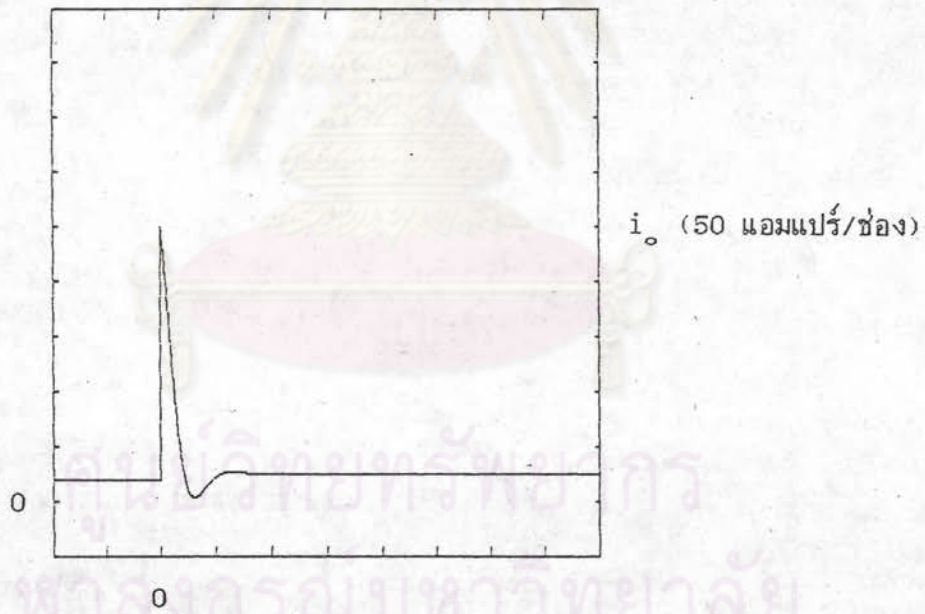
รูปที่ 3.27 ผลการจำลองการทำงานของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ด้วยคอมพิวเตอรื  
เมื่อทำงานในโหมดกระแส และมีการเพิ่มโหลดแบบขึ้น  
จาก 0 โวลต์ เป็น 30 โวลต์





สเกลเวลา 0.5 มิลลิวินาที/ช่อง

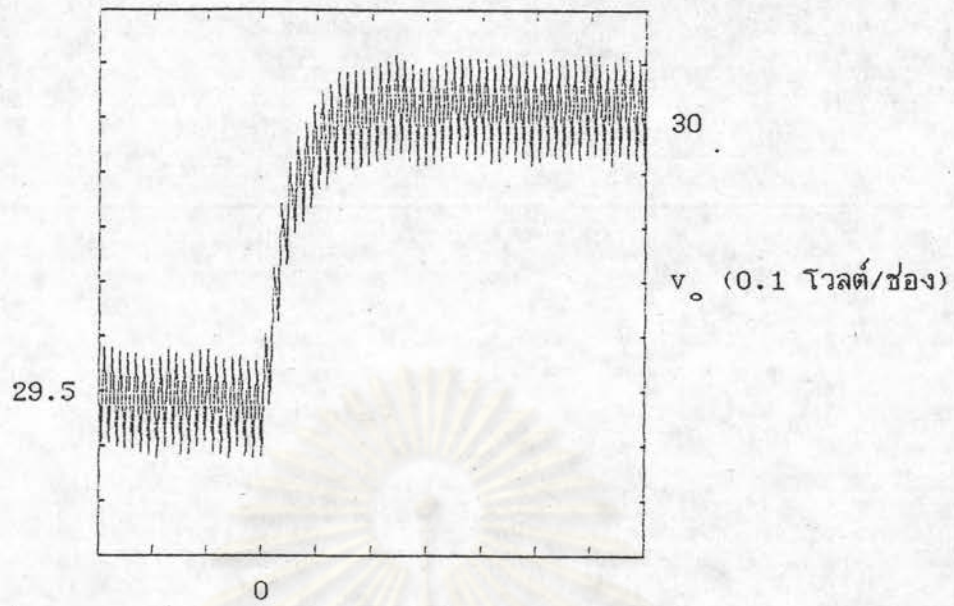
ก. รูปคลื่นแรงดันออก ( $v_o$ ) และกระแสในตัวเหนี่ยวนำ ( $i_L$ )



สเกลเวลา 0.5 มิลลิวินาที/ช่อง

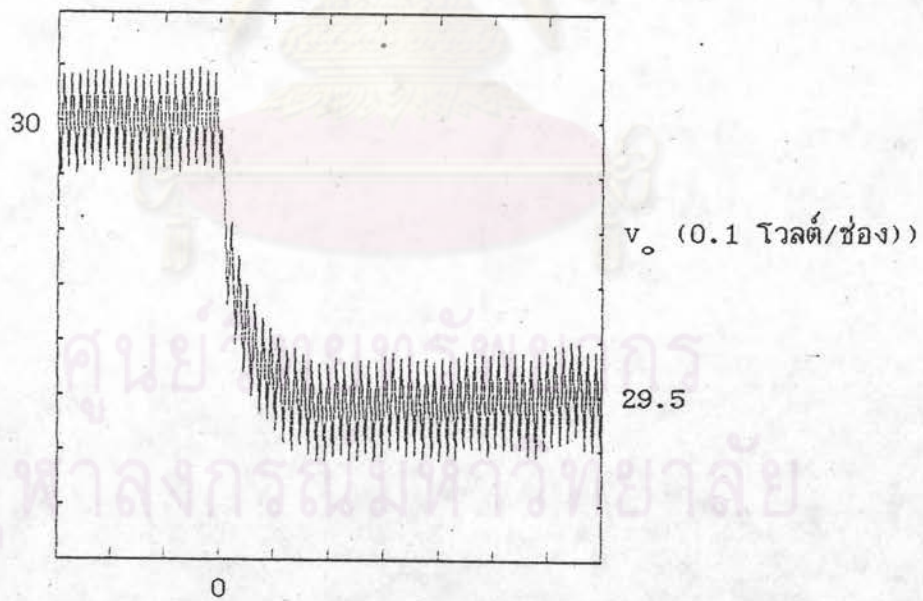
ข. รูปคลื่นแรงดันออก ( $v_o$ ) และกระแสออก ( $i_o$ )

รูปที่ 3.28 ผลการจำลองการทำงานของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ด้วยคอมพิวเตอรื  
เมื่อทำงานในภาคกระแส และมีการลดโหลดแบบขึ้น  
จาก 30 โวลต์ เป็น 0 โวลต์



สเกลเวลา 0.2 มิลลิวินาที/ช่อง

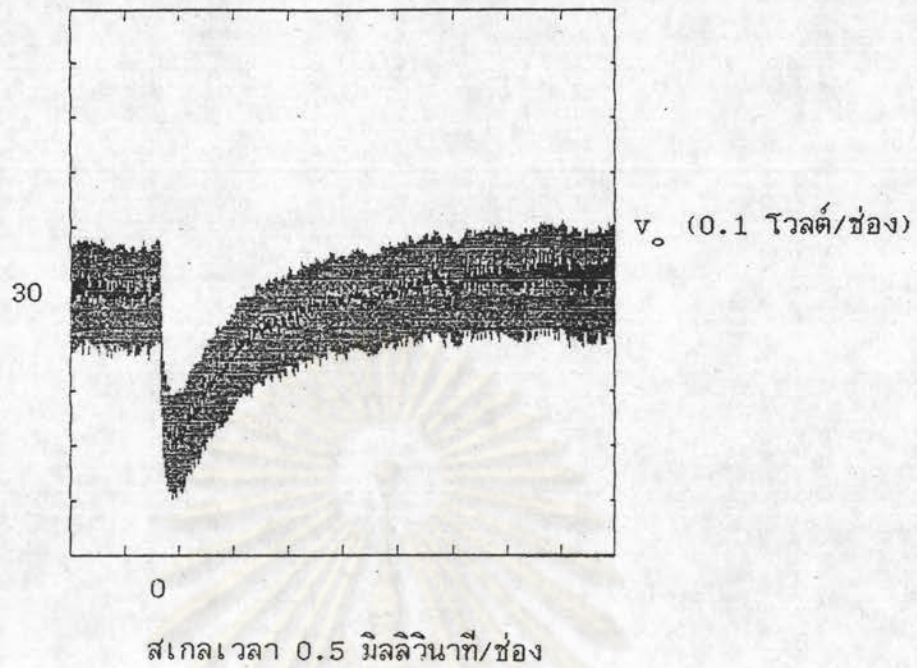
รูปที่ 3.29 ผลการจำลองการทำงานของระบบที่ได้จากการขนานชุดวงจรถูกกำลังด้วยคอมพิวเตอรื เมื่อทำงานในภาคแรงดัน และได้รับแรงดันตั้งค่าแบบขั้นขนาดเล็จาก 5.7 โวลต์ เป็น 5.8 โวลต์



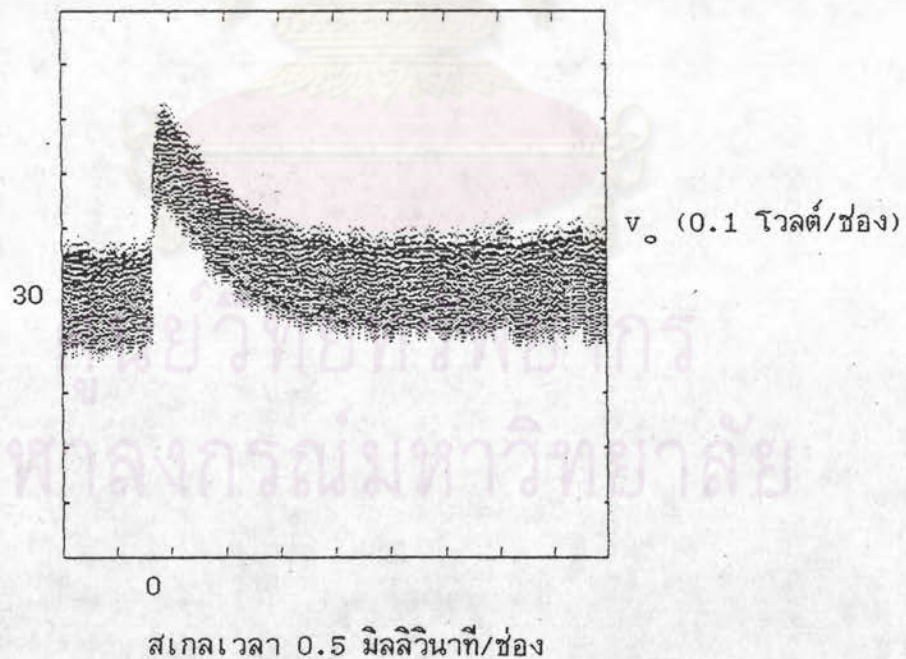
สเกลเวลา 0.2 มิลลิวินาที/ช่อง

รูปที่ 3.30 ผลการจำลองการทำงานของระบบที่ได้จากการขนานชุดวงจรถูกกำลังด้วยคอมพิวเตอรื เมื่อทำงานในภาคแรงดัน และได้รับแรงดันตั้งค่าแบบขั้นขนาดเล็จาก 5.8 โวลต์ เป็น 5.7 โวลต์

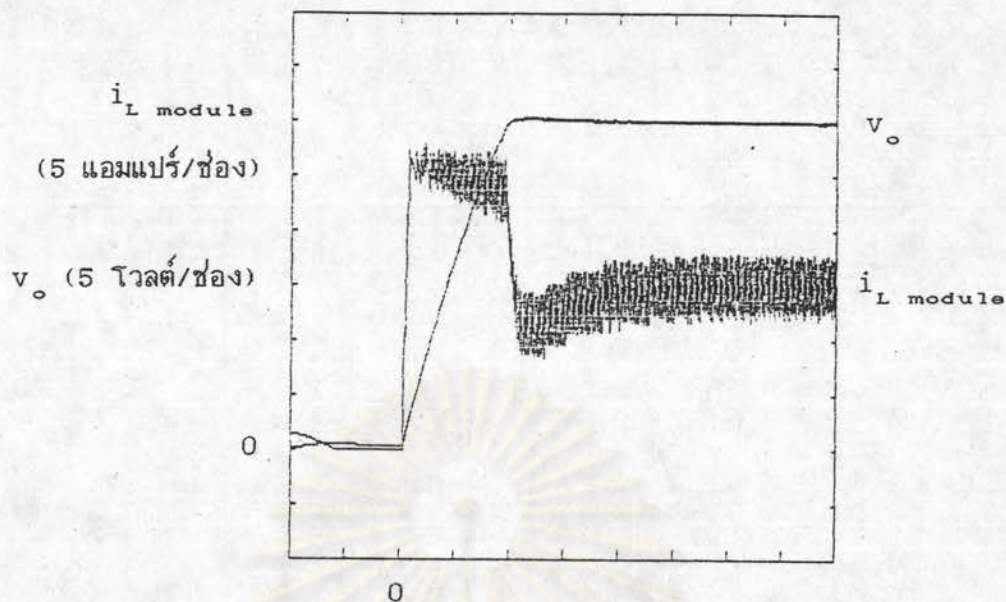




รูปที่ 3.31 ผลการจำลองการทำงานของระบบที่ได้จากการขนานชุดวงจรถูกกำลังด้วยคอมพิวเตอรื เมื่อทำงานในภาคแรงดัน และมีการเพิ่มโหลดแบบขั้นขนาดเล็จาก 18 แอมแปร์ เป็น 30 แอมแปร์

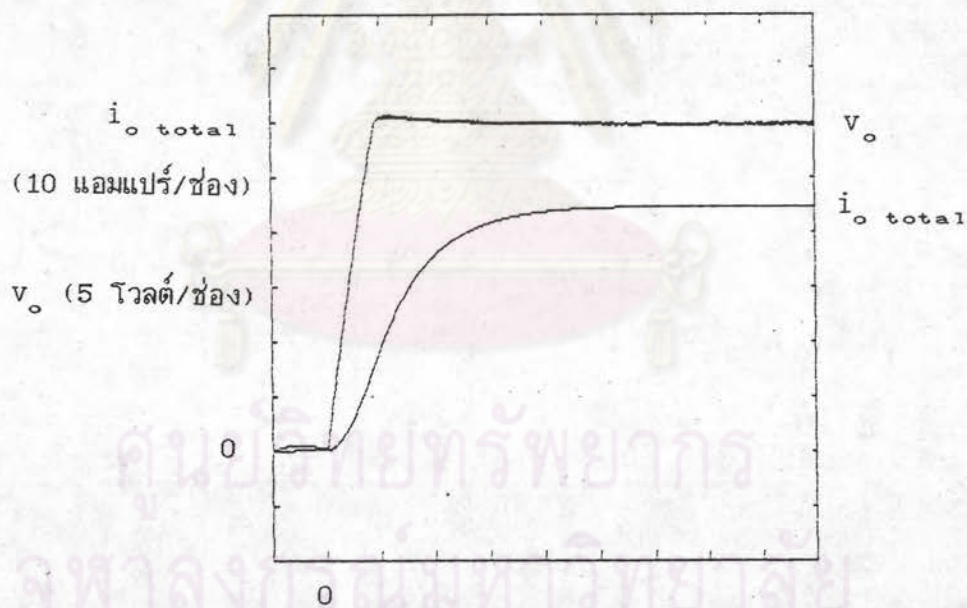


รูปที่ 3.32 ผลการจำลองการทำงานของระบบที่ได้จากการขนานชุดวงจรถูกกำลังด้วยคอมพิวเตอรื เมื่อทำงานในภาคแรงดัน และมีการลดโหลดแบบขั้นขนาดเล็จาก 30 แอมแปร์ เป็น 18 แอมแปร์



สเกลเวลา 0.5 มิลลิวินาที/ช่อง

ก. รูปคลื่นแรงดันออก ( $v_o$ ) และกระแสในตัวเหนี่ยวนำของชุดวงจร ( $i_{L \text{ module}}$ )

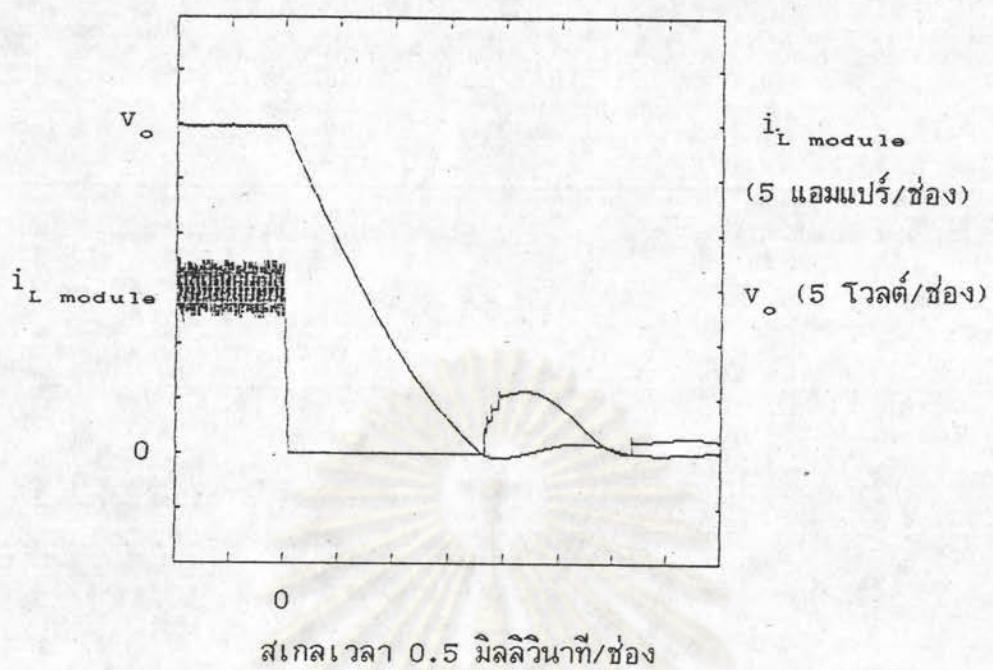


สเกลเวลา 1 มิลลิวินาที/ช่อง

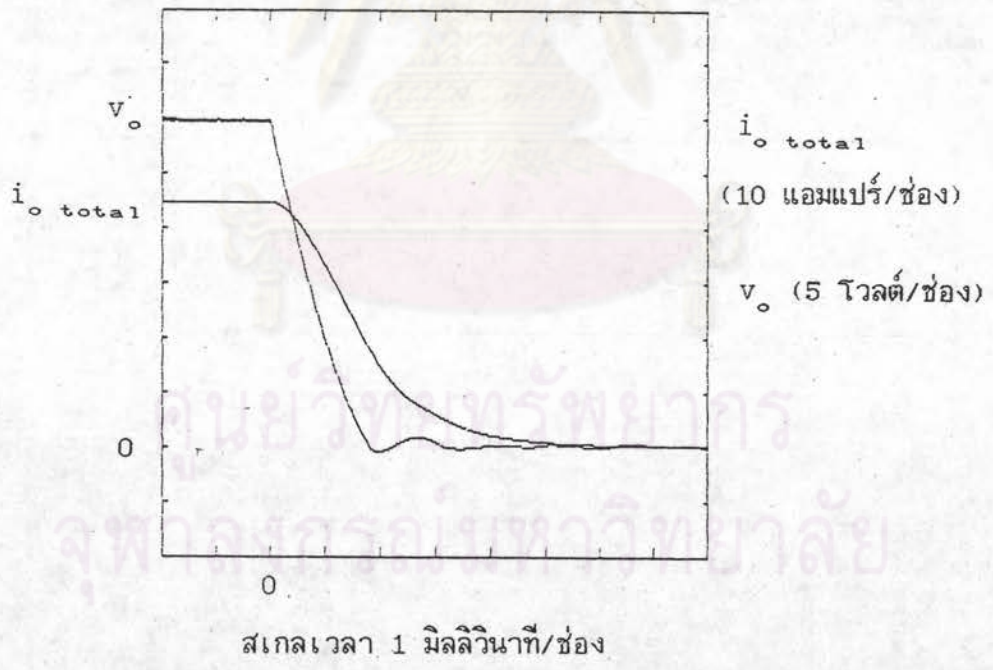
ข. รูปคลื่นแรงดันออก ( $v_o$ ) และกระแสออกรวม ( $i_{o \text{ total}}$ )

รูปที่ 3.33 ผลการจำลองการทำงานของระบบที่ได้จากการขนานชุดวงจรกำลังด้วยคอมพิวเตอรื เมื่อทำงานในภาคแรงดัน และได้รับแรงดันตั้งค่าแบบขึ้นจาก 0 โวลต์ เป็น 5.8 โวลต์



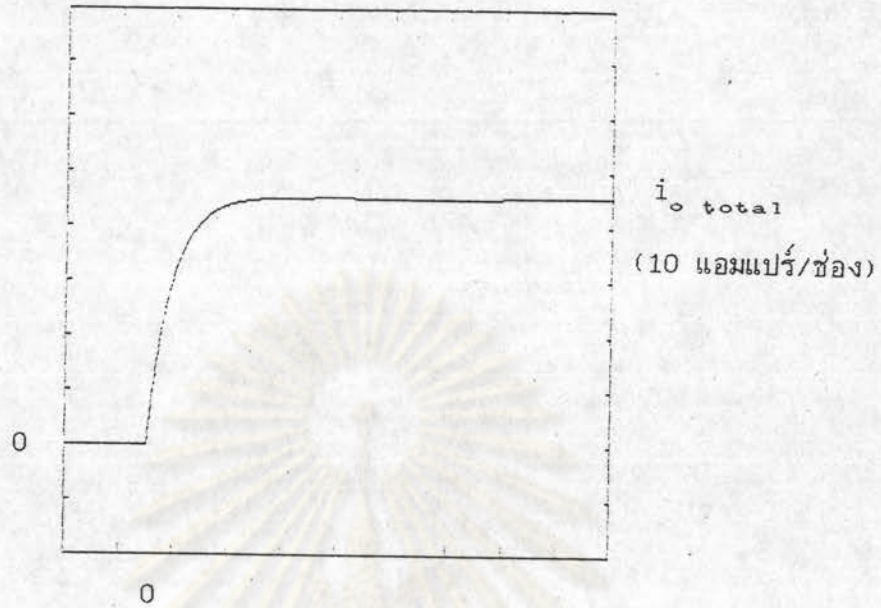


ก. รูปคลื่นแรงดันออก ( $V_o$ ) และกระแสในตัวเหนี่ยวนำของชุดวงจร ( $i_{L \text{ module}}$ )



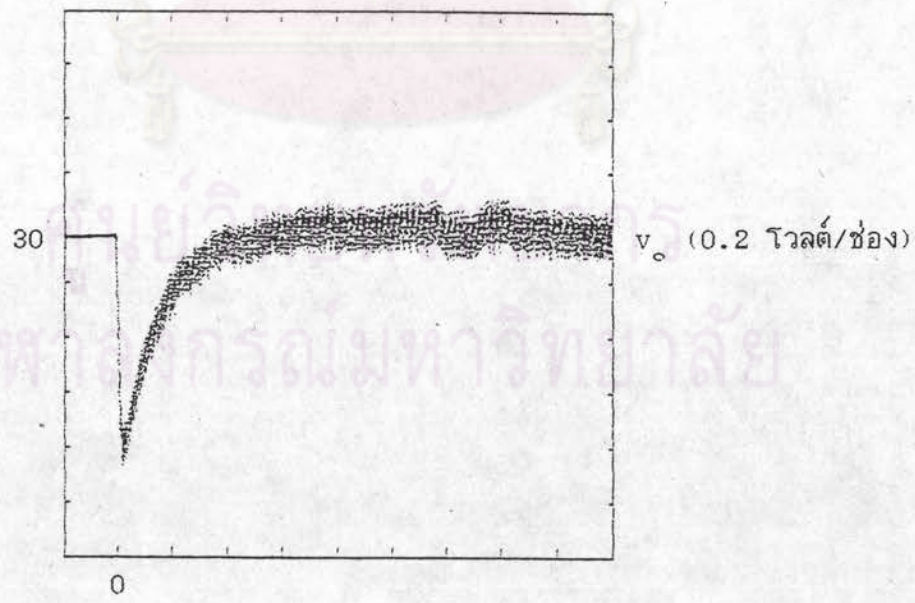
ข. รูปคลื่นแรงดันออก ( $V_o$ ) และกระแสออกรวม ( $i_{o \text{ total}}$ )

รูปที่ 3.34 ผลการจำลองการทำงานของระบบที่ได้จากการขนานชุดวงจรกำลังด้วยคอมพิวเตอรื เมื่อทำงานในภาคแรงดัน และได้รับแรงดันตั้งค่าแบบขึ้นจาก 5.8 โวลต์ เป็น 0 โวลต์



สเกลเวลา 2 มิลลิวินาที/ช่อง

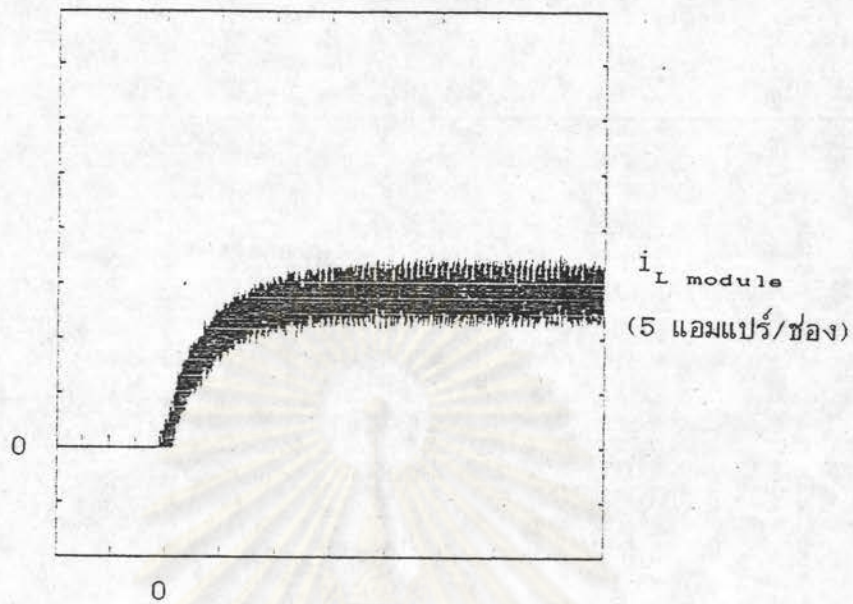
ก. รูปคลื่นกระแสออกรวม ( $i_o \text{ total}$ )



สเกลเวลา 2 มิลลิวินาที/ช่อง

ข. รูปคลื่นแรงดันออก ( $v_o$ )



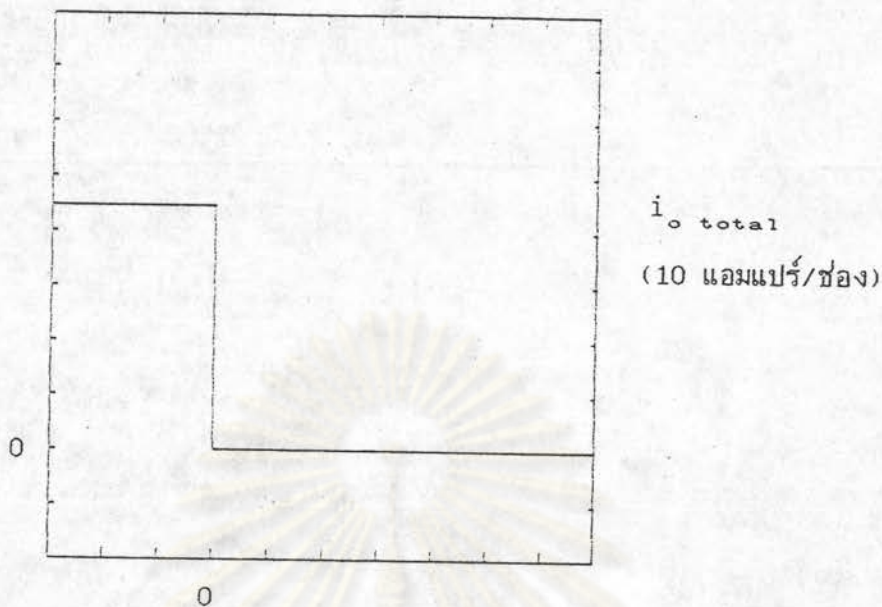


สเกลเวลา 1 มิลลิวินาที/ช่อง

ค. รูปคลื่นกระแสในตัวเหนี่ยวนำของชุดวงจร ( $i_{L \text{ module}}$ )

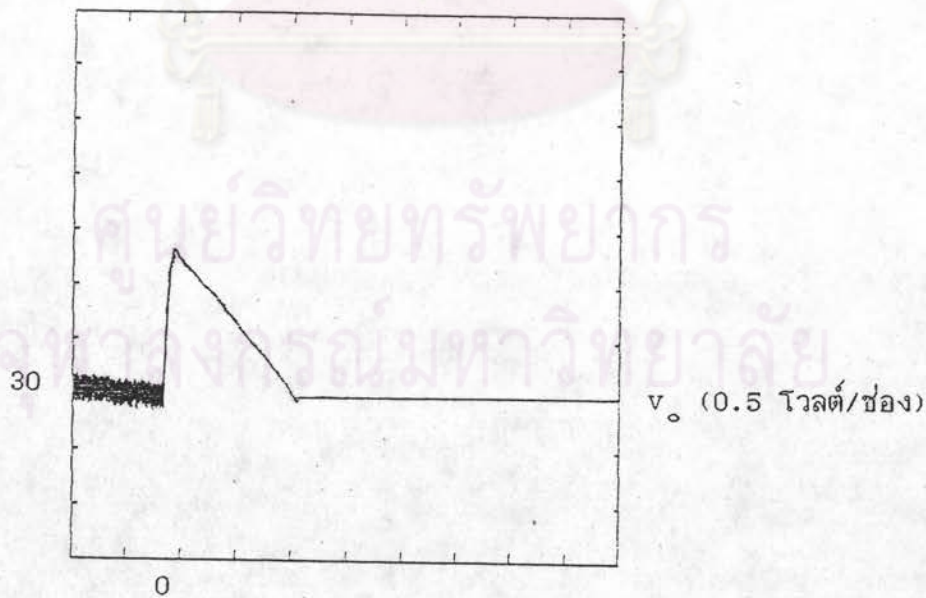
รูปที่ 3.35 ผลการจำลองการทำงานของระบบที่ได้จากการขนานชุดวงจรกำลังด้วยคอมพิวเตอรื เมื่อทำงานในภาคแรงดัน และมีการเพิ่มโหลดแบบขึ้นจาก 0 แอมแปร์ เป็น 45 แอมแปร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สเกลเวลา 0.2 มิลลิวินาที/ช่อง

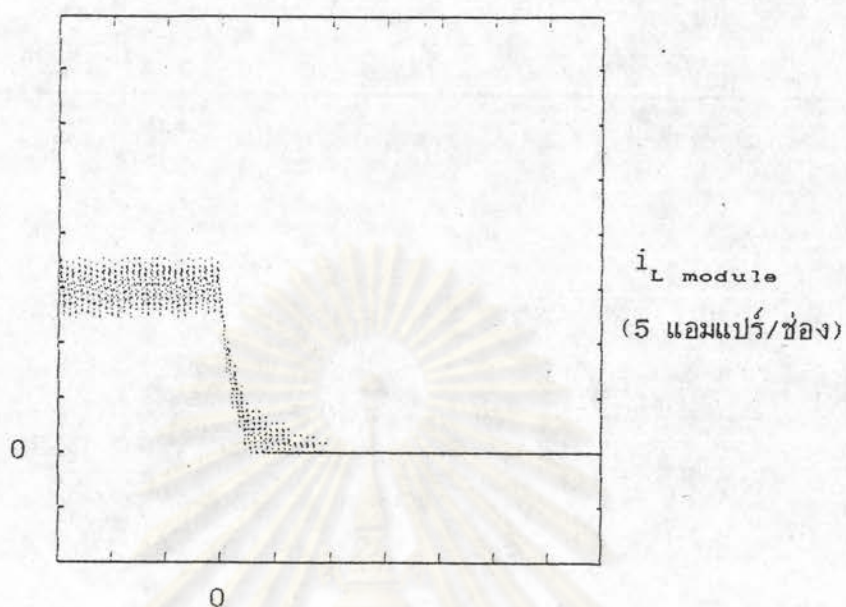
ก. รูปคลื่นกระแสออกรวม ( $i_o \text{ total}$ )



สเกลเวลา 100 มิลลิวินาที

ข. รูปคลื่นแรงดันออก ( $v_o$ )





สเกลเวลา 0.2 มิลลิวินาที/ช่อง

ค. รูปคลื่นกระแสในตัวเหนี่ยวนำของชุดวงจร ( $i_{L \text{ module}}$ )

รูปที่ 3.36 ผลการจำลองการทำงานของระบบที่ได้จากการขนานชุดวงจรกำลังด้วยคอมพิวเตอรื เมื่อทำงานในภาคแรงดัน และมีการลดโหลดแบบทันทีจาก 45 แอมแปร์ เป็น 0 แอมแปร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย