หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

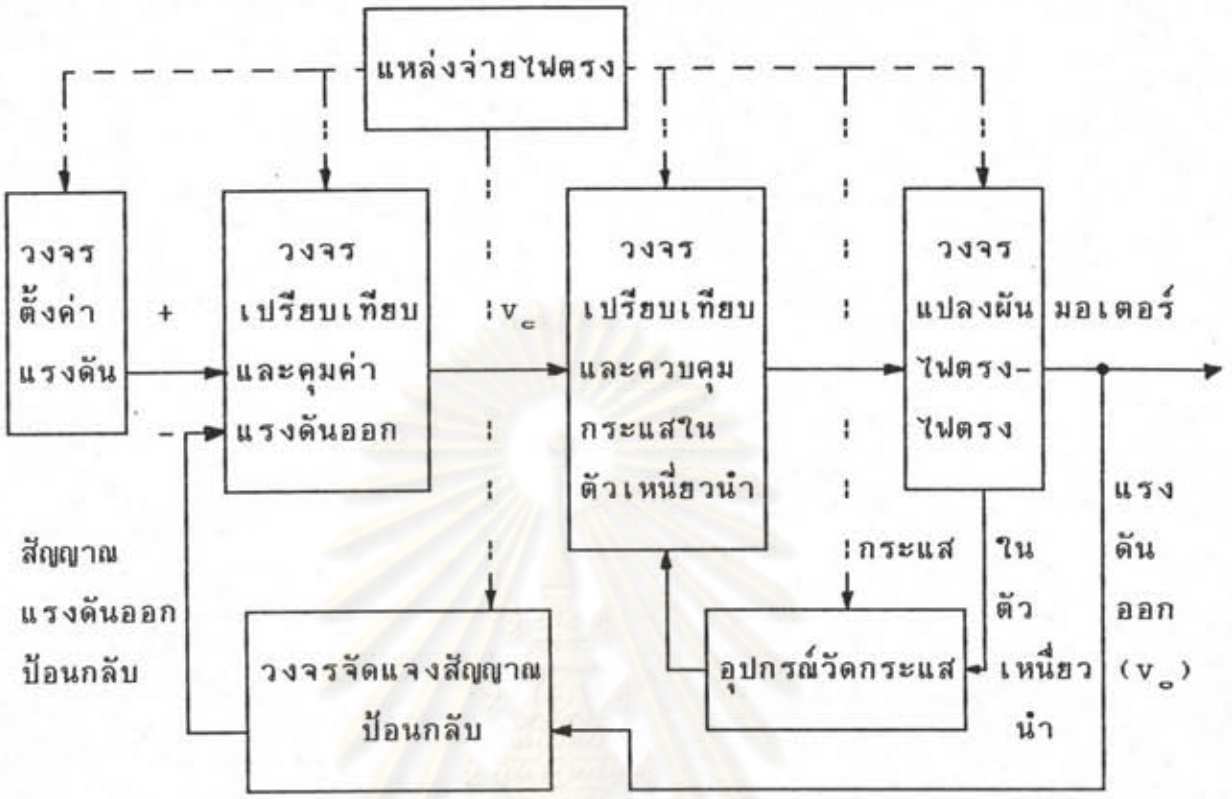
บทที่ 3

การออกแบบและการจำลองแบบวงจรขยายเชอร์โวกระแสตรง

ในบทที่ผ่านมาได้มีการเลือกชนิดของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง รูปแบบและลำดับการทำงานของสวิตช์ ตลอดจนวิธีการควบคุมวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงการออกแบบโครงสร้างและลักษณะการทำงานของวงจรขยายเชอร์โวกระแสตรง การออกแบบค่าอุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับจำลองการทำงานของวงจรขยายเชอร์โวกระแสตรง การออกแบบฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรคุมค่า ตลอดจนการจำลองการทำงานของวงจรขยายเชอร์โวกระแสตรงด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาและปรับปรุงระบบให้ดีขึ้นและเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับผลการวัดจากวงจรขยายเชอร์โวกระแสตรงที่สร้างขึ้น ส่วนการออกแบบและเลือกอุปกรณ์อื่น ๆ ตลอดจนการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการควบคุมจะอยู่ในบทที่ 4

3.1 การออกแบบโครงสร้างของวงจรขยายเชอร์โวกระแสตรง

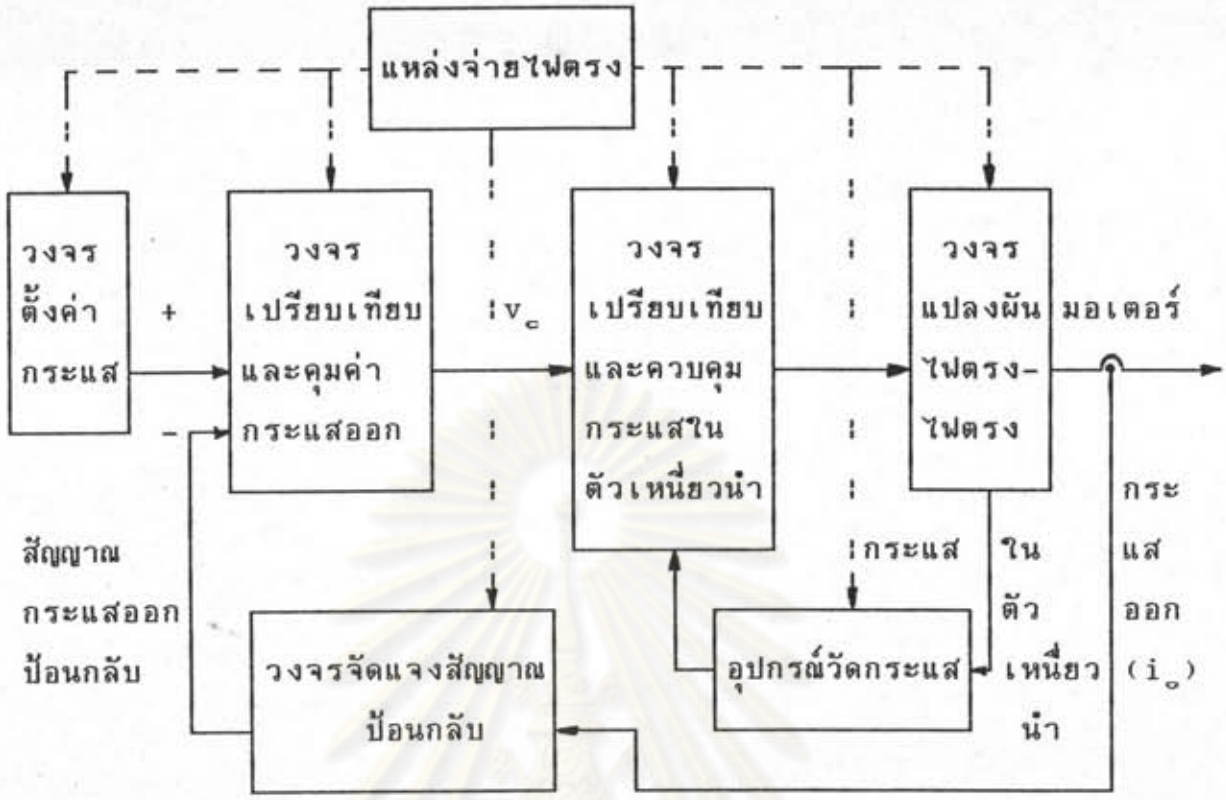
ในการควบคุมช่วงเวลาการทำงานของสวิตช์ของวงจรแปรผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบริดจ์ได้เลือกใช้การควบคุมโดยการกำหนดกระแส (current programmed mode) เพื่อให้วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงมีลักษณะเป็นแหล่งจ่ายกระแส แต่การควบคุมวงจรขยายเชอร์โวกระแสตรงที่จะจ่ายกำลังให้โหลดนั้นอาจจะเลือกควบคุมแรงดันออกหรือกระแสออกของวงจรขยายเชอร์โวกระแสตรงก็ได้ ซึ่งจะมีผลทำให้วงจรขยายเชอร์โวกระแสตรงมีลักษณะเป็นแหล่งจ่ายแรงดันหรือกระแสตามลำดับ ถ้าให้วงจรขยายเชอร์โวกระแสตรงทำงานในภาคแรงดัน (ควบคุมแรงดัน) วงจรขยายเชอร์โวกระแสตรงจะมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.1 แต่ถ้าให้วงจรขยายเชอร์โวกระแสตรงทำงานในภาคกระแส (ควบคุมกระแส) วงจรขยายเชอร์โวกระแสตรงจะมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงเมื่อทำงานในภาคแรงดัน

เมื่อเปรียบเทียบบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.1 และ 3.2 จะเห็นได้ว่ามีความแตกต่างกันเฉพาะในส่วนของวงจรคุมค่าและอุปกรณ์วัดสัญญาณที่ต้องการควบคุมเท่านั้น ส่วนวงจรตั้งค่านั้นไม่ว่าจะเป็นการตั้งค่ากระแสหรือการตั้งค่าแรงดันก็ตามจะใช้สัญญาณเป็นแรงดัน 0-10 โวลต์ แทนค่าตัวแปรที่ต้องการควบคุมจาก 0 -100% ของค่าพิกัด ในแต่ละส่วนของระบบควบคุมนั้นโดยทั่วไปจะประกอบด้วยวงจรย่อยแตกต่างกันดังต่อไปนี้คือ

3.1.1 <u>วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง</u> เป็นวงจรที่ทำหน้าที่ควบคุมพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงที่ใช้เป็นวงจรบริดจ์ที่มีการควบคุมช่วงเวลาการทำงานของสวิตช์โดยการกำหนดกระแสทั้งในกรณีที่วงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงทำงานในภาคแรงดันและภาคกระแส มีลำดับการทำงานของสวิตช์ในภาวะปกติเป็นแบบ Limited Unipolar เพื่อลดขนาดของการกระเพื่อมของกระแสในตัวเหนี่ยวนำและมีการสลับสวิตช์ที่นำกระแส

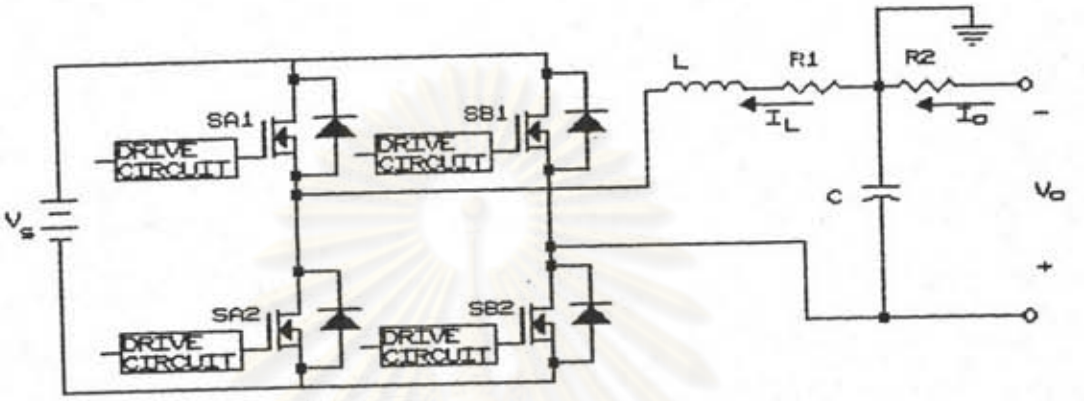


รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงเมื่อทำงานในภาคกระแส

ตลอดคาบในกลุ่มของสวิตช์ที่นำกระแสเพื่อกระจายกำลังสูญเสียในสวิตช์ให้สม่ำเสมอดังได้กล่าวมาแล้ว และเปลี่ยนการทำงานเป็นแบบ bipolar เมื่อวงจรไม่สามารถจะจำกัดกระแสได้ถ้าทำงานแบบ limited unipolar และนอกจากนี้เพื่อเป็นการลดกำลังสูญเสียในมอเตอร์อันเนื่องมาจากองค์ประกอบของไฟฟ้ากระแสสลับที่เกิดจากการทำงานสวิตช์จึงใช้วงจรกรอง LC แบบผ่านต่ำเป็นกิ่งกระแสด้านออกแทนที่จะใช้วงจรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์โดยตรง ดังแสดงในรูปที่ 3.3 นอกจากนี้แล้ววงจรในรูปที่ 3.3 ได้แสดงการวางตำแหน่งกราวด์ของระบบควบคุม, ความต้านทานที่ใช้ตรวจจับกระแสในตัวเหนี่ยว, ความต้านทานที่ใช้ตรวจจับกระแสออก และวงจรขับนำสวิตช์

วงจรขับนำสวิตช์(drive circuit) เป็นวงจรที่รับคำสั่งจากวงจรเปรียบเทียบและควบคุมกระแสของวงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟตรง เพื่อขับนำสวิตช์ของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง

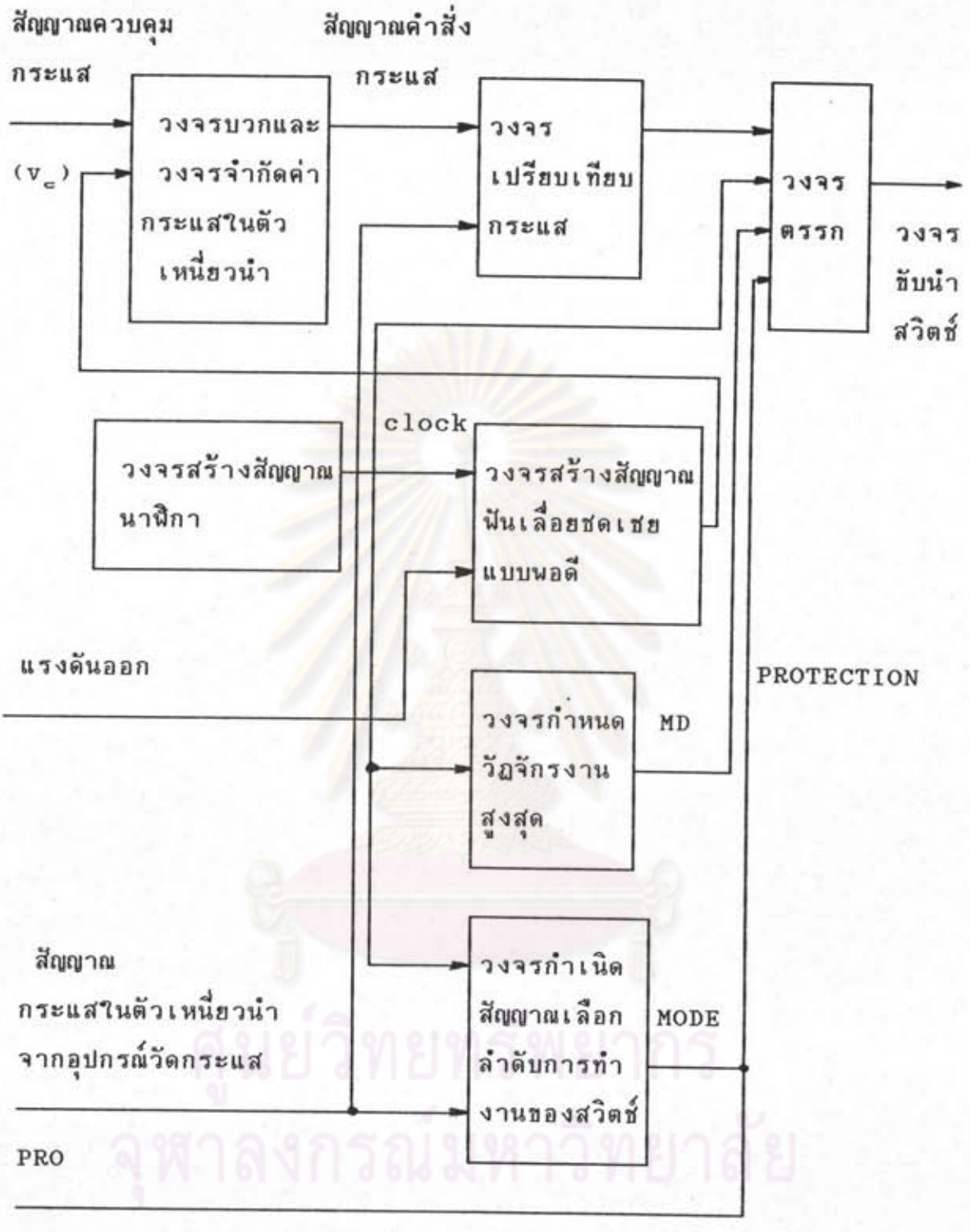
การใช้กระแสในตัวเหนี่ยวนำในการป้อนกลับเพื่อควบคุมช่วงเวลาการทำงานสวิตช์จะมีความเหมาะสมมากกว่าการใช้กระแสในสวิตช์ เนื่องจากวงจรมีสวิตช์หลายตัวและกระแสในตัวเหนี่ยวนำจะเป็นกระแสปริมาณเดียวกันกับกระแสในสวิตช์ในขณะที่นำกระแส ดังนั้นจึงเลือกใช้กระแสในตัวเหนี่ยวนำในการป้อนกลับเพื่อควบคุมช่วงเวลาการทำงานของสวิตช์



รูปที่ 3.3 วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง

3.1.2 <u>วงจรเปรียบเทียบและควบคุมกระแสของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง</u> เป็นวงจรที่ทำหน้าที่ควบคุมกระแสในตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ให้มีค่าสูงสุดเท่ากับสัญญาณคำสั่งกระแสและมีความถี่การทำงานของสวิตช์คงที่ โดยให้สัญญาณออกเป็นสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมการขับนำสวิตช์ของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงภาคกำลัง ซึ่งเป็นวงจรแบบบริดจ์ สัญญาณคำสั่งกระแสดังกล่าวเป็นสัญญาณควบคุมกระแสจากวงจรเปรียบเทียบและคุมค่ากระแสหรือแรงดันออกที่ถูกลดค่าด้วยสัญญาณฟันเลื่อยชดเชยแบบพอดี วงจรเปรียบเทียบกระแสและวงจรตรรกจะทำหน้าที่กำหนดลำดับและช่วงเวลาการทำงานของสวิตช์เพื่อให้เป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้ วงจรควบคุมดังกล่าวจะมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยวงจรย่อยแต่ละส่วนจะมีหน้าที่และลักษณะการทำงานดังนี้คือ

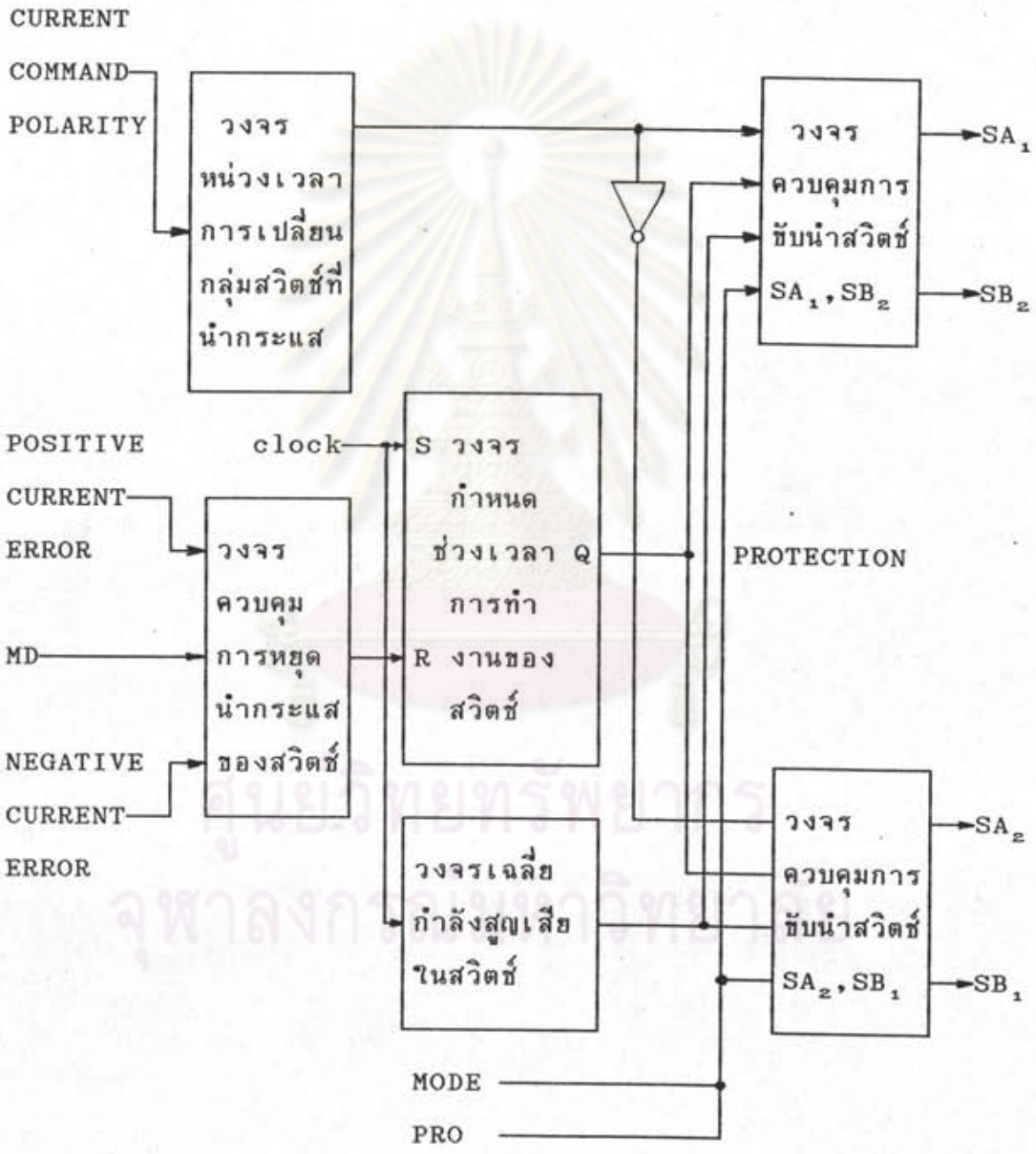
3.1.2.1 <u>วงจรตรรก</u> ทำหน้าที่เลือกกลุ่มของสวิตช์ที่จะนำกระแสโดยอาศัยสัญญาณจากวงจรบอกขั้วของสัญญาณคำสั่งกระแสในตัวเหนี่ยวนำ กำหนดลำดับการทำงานของสวิตช์โดยขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสออกตลอดจนกำหนดช่วงเวลาการทำงานของสวิตช์โดยอาศัยสัญญาณนาฬิกาและ



รูปที่ 3.4 บล็อกไดอะแกรมของวงจรเปรียบเทียบและควบคุมกระแสของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง

สัญญาณออกของวงจรเปรียบเทียบกระแสทั้งสองชุดดังจะกล่าวต่อไปหรืออาจจะใช้สัญญาณจากวงจรกำหนดวัฏจักรงานสูงสุด ในกรณีที่กระแสในตัวเหนี่ยวนำไม่

สามารถจะเพิ่มขนาดไปจนมีค่าเท่ากับสัญญาณคำสั่งกระแสถึงแม้วัฏจักรการทำงานจะมีค่าเท่ากับวัฏจักรงานสูงสุดแล้ว ซึ่งกรณีนี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีการเพิ่มค่าสัญญาณคำสั่งกระแสหรือเพิ่มโหลดมากอย่างกะทันหัน รูปที่ 3.5 แสดงโครงสร้างของวงจรตรรกที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของสวิตช์ ซึ่งวงจรย่อยแต่ละส่วนจะมีหน้าที่และลักษณะการทำงานดังนี้ คือ



รูปที่ 3.5 บล็อกไดอะแกรมของวงจรตรรก

3.1.2.1.1 <u>วงจรกำหนดช่วงเวลาการทำงานของสวิตช์</u> จะทำหน้าที่สร้างสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมการนำหรือหยุดนำกระแสของสวิตช์ วงจรนี้ได้รับสัญญาณจากวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาและวงจรควบคุมการหยุดนำกระแสของสวิตช์ โดยการเริ่มนำกระแสจะถูกควบคุมโดยสัญญาณนาฬิกาเพื่อให้ความถี่ในการสวิตช์คงที่ ส่วนการหยุดนำกระแสจะถูกควบคุมโดยวงจรควบคุมการหยุดนำกระแสของสวิตช์ สัญญาณออกของวงจรกำหนดช่วงเวลาการทำงานของสวิตช์จะควบคุมช่วงเวลาการทำงานของสวิตช์โดยผ่านวงจรควบคุมการขับนำสวิตช์และวงจรขับนำสวิตช์

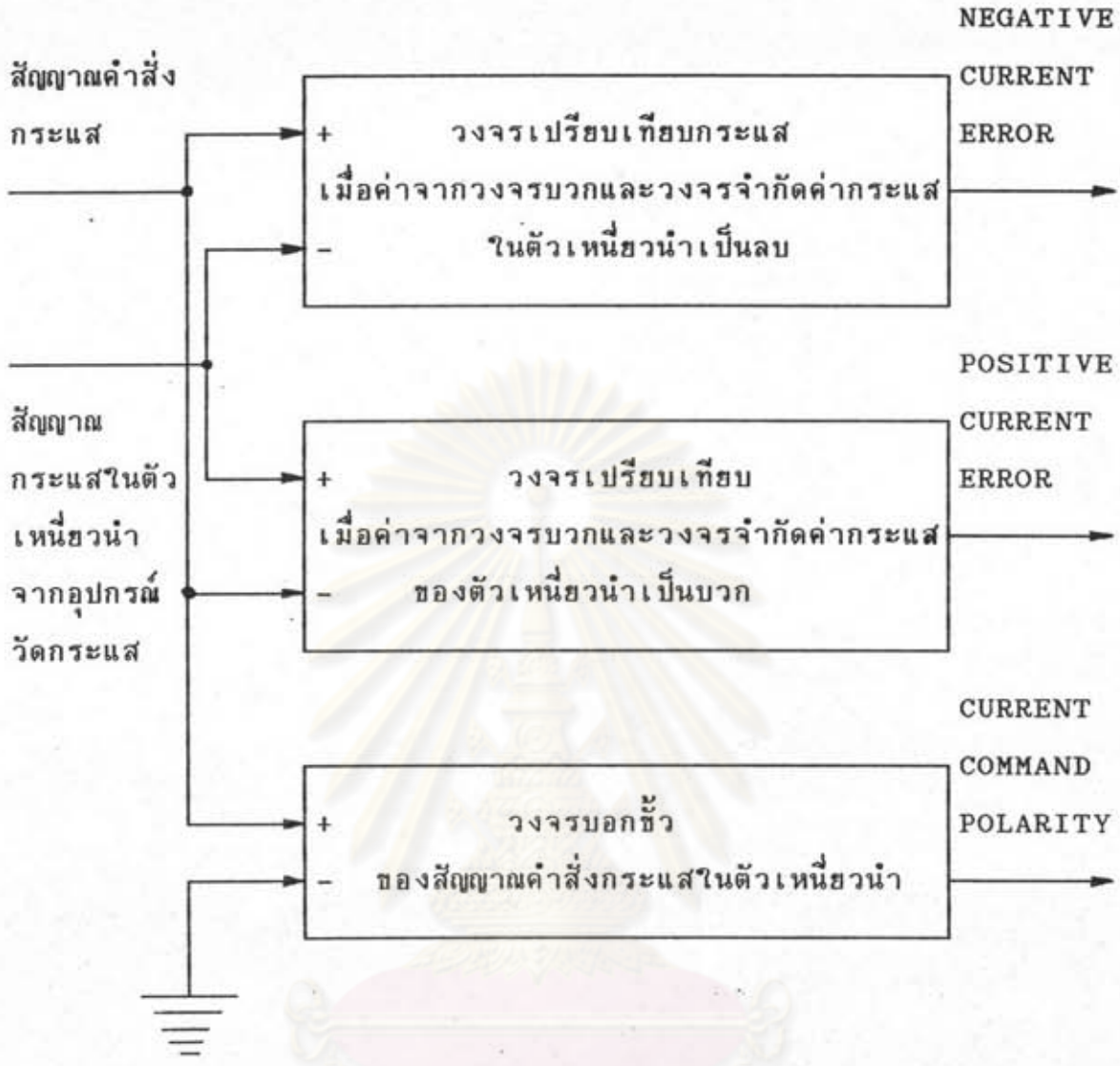
3.1.2.1.2 <u>วงจรควบคุมการหยุดนำกระแสของสวิตช์</u> เป็นวงจรที่ทำหน้าที่เลือกสัญญาณที่ใช้ในการกำหนดช่วงเวลาการหยุดนำกระแสเพื่อป้อนให้กับวงจรกำหนดช่วงเวลาการทำงานของสวิตช์ ในภาวะปกติจะเลือกจากสัญญาณ POSITIVE CURRENT ERROR หรือ NEGATIVE CURRENT ERROR โดยใช้สัญญาณออกจากวงจรบอกขั้วของสัญญาณคำสั่งกระแสในตัวเหนี่ยวนำ(CURRENT COMMAND POLARITY)เป็นเงื่อนไขในการเลือก แต่ในกรณีที่ไม่มีสัญญาณจากวงจรเปรียบเทียบ วงจรควบคุมการหยุดนำกระแสของสวิตช์จะใช้สัญญาณออกของวงจรกำหนดวัฏจักรงานสูงสุด(MD)เพื่อป้อนให้กับวงจรกำหนดช่วงเวลาการทำงานของสวิตช์

3.1.2.1.3 <u>วงจรหน่วงเวลาการเปลี่ยนกลุ่มสวิตช์ที่นำกระแส</u> ทำหน้าที่หน่วงเวลาการเปลี่ยนกลุ่มสวิตช์ที่จะนำกระแสโดยจะหน่วงเวลาการเริ่มนำกระแสของกลุ่มสวิตช์ที่จะนำกระแสในคาบต่อไปไว้เพื่อรอให้สวิตช์ที่นำกระแสอยู่หยุดนำกระแสก่อนอันจะเป็นการป้องกันไม่ให้สวิตช์ในกิ่งเดียวกันนำกระแสพร้อมกัน ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดความเสียหายกับสวิตช์ได้

3.1.2.1.4 <u>วงจรเฉลี่ยกำลังสูญเสียในสวิตช์</u> วงจรนี้ทำการเฉลี่ยกำลังสูญเสียในสวิตช์ในขณะที่วงจรมีลำดับการทำงานของสวิตช์เป็นแบบ limited unipolar วงจรนี้ประกอบด้วยวงจรหาร 2 และวงจรเกต ซึ่งจะทำหน้าที่สลับตัวสวิตช์ที่จะนำกระแสตลอดคาบการทำงานภายในกลุ่มสวิตช์ที่นำกระแสโดยจะให้มีการสลับกันทุกคาบของการทำงาน ซึ่งจะมีผลทำให้กำลังสูญเสียในสวิตช์กลุ่มที่นำกระแสและกำลังสูญเสียในไดโอดของสวิตช์กลุ่มที่ไม่ได้นำกระแสมีความแตกต่างกันน้อยลง

3.1.2.1.5 <u>วงจรควบคุมการขับนำสวิตช์</u>
วงจรนี้ทำหน้าที่ป้อนสัญญาณให้กับวงจรขับนำสวิตช์ที่จะนำกระแสตามเงื่อนไขของสัญญาณที่ได้จากวงจรกำหนดช่วงเวลาการทำงานของสวิตช์, วงจรกำเนิดสัญญาณเลือกลำดับการทำงานของสวิตช์, วงจรเฉลี่ยกำลังสูญเสียในสวิตช์และวงจรหน่วงเวลาการเปลี่ยนกลุ่มของสวิตช์ที่นำกระแส วงจรควบคุมการขับนำสวิตช์แบ่งออกเป็น 2กลุ่ม คือ กลุ่มที่ให้กระแสและแรงดันออกเป็นบวกซึ่งจะนำกระแสเมื่อสัญญาณบอกขั้วของสัญญาณคำสั่งกระแสในตัวเหนี่ยวนำมีค่าเป็น 1และกลุ่มที่ให้กระแสและแรงดันออกเป็นลบ ซึ่งจะนำกระแสเมื่อสัญญาณบอกขั้วของสัญญาณคำสั่งกระแสในตัวเหนี่ยวนำเป็น 0

3.1.2.2 <u>วงจรเปรียบเทียบกระแส</u> ทำหน้าที่เปรียบเทียบสัญญาณคำสั่งกระแสจากวงจรบวกและวงจรจำกัดค่ากระแสในตัวเหนี่ยวนำกับสัญญาณกระแสในตัวเหนี่ยวนำจากอุปกรณ์วัดกระแสในตัวเหนี่ยวนำ ถ้าสัญญาณกระแสในตัวเหนี่ยวนำ มีค่ามากกว่า สัญญาณคำสั่งกระแส วงจรเปรียบเทียบก็จะให้สัญญาณตรรกมีค่าเป็น 1 เพื่อส่งต่อแก่วงจรตรรก แต่เนื่องจากกระแสออกและแรงดันออกของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงอาจจะมีค่าเป็นบวกหรือลบก็ได้ วงจรควบคุมจึงต้องสามารถควบคุมกระแสในตัวเหนี่ยวนำให้เป็นได้ทั้งบวกและลบ สัญญาณออกของวงจรบวกและวงจรจำกัดค่ากระแสในตัวเหนี่ยวนำซึ่งใช้ในการควบคุมกระแสในตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าได้ทั้งบวกหรือลบด้วย ดังนั้นการเปรียบเทียบกระแสจะต้องสามารถเปรียบเทียบและให้สัญญาณควบคุมที่ถูกต้องแก่วงจรตรรกเพื่อให้สามารถกำหนดกลุ่มสวิตช์ที่นำกระแสและช่วงเวลาการทำงานของสวิตช์ได้อย่างถูกต้อง รูปที่ 3.6 แสดงโครงสร้างของวงจรเปรียบเทียบกระแสที่ใช้ จะเห็นได้ว่าวงจรเปรียบเทียบกระแสประกอบด้วยวงจรเปรียบเทียบย่อย 2 ชุดและวงจรบอกขั้วของสัญญาณคำสั่งกระแสในตัวเหนี่ยวนำ 1 ชุด วงจรตรรกจะใช้สัญญาณออกของวงจรบอกขั้วของสัญญาณควบคุมกระแสในตัวเหนี่ยวนำ(CURRENT COMMAND POLARITY) ในการเลือกกลุ่มของสวิตช์ที่จะนำกระแสเมื่อได้รับสัญญาณนาฬิกาและเลือกสัญญาณความคลาดเคลื่อนของกระแสกลุ่มที่เป็นบวก (POSITIVE CURRENT ERROR) หรือลบ (NEGATIVE CURRENT ERROR) ในการควบคุมการหยุดนำกระแสของสวิตช์ที่กำลังนำกระแสอยู่ ส่วนลำดับการทำงานของสวิตช์นั้นจะถูกกำหนดโดยวงจรเฉลี่ยกำลังสูญเสียในสวิตช์และวงจรกำเนิดสัญญาณเลือกลำดับการทำงานของสวิตช์



รูปที่ 3.6 บล็อกไดอะแกรมของวงจรเปรียบเทียบกระแส

3.1.2.3 <u>วงจรบวกและวงจรจำกัดค่ากระแสในตัวเหนี่ยวนำ</u> ทำหน้าที่บวกสัญญาณควบคุมกระแสที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบและควบคุมค่ากระแสหรือแรงดันออกของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงเข้ากับสัญญาณฟันเลื่อยชดเชยแบบพอดีซึ่งจะมีขั้วที่ต่างกัน เพื่อให้วงจรทำงานอย่างมีเสถียรภาพดังได้กล่าวมาแล้ว สัญญาณออกของวงจรบวกและวงจรจำกัดค่ากระแสในตัวเหนี่ยวนำจะเป็นสัญญาณกำหนดค่าสูงสุดของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ วงจรเปรียบเทียบกระแสจะเปรียบเทียบสัญญาณดังกล่าวกับสัญญาณออกของอุปกรณ์วัดกระแสในตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง โดยจะสั่งให้สวิตช์หยุดนำกระแสตามการควบคุมลำดับการทำงานของสวิตช์แบบ limited unipolar เมื่อกระแสในตัว

เหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับสัญญาณกำหนดค่าสูงสุดของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ

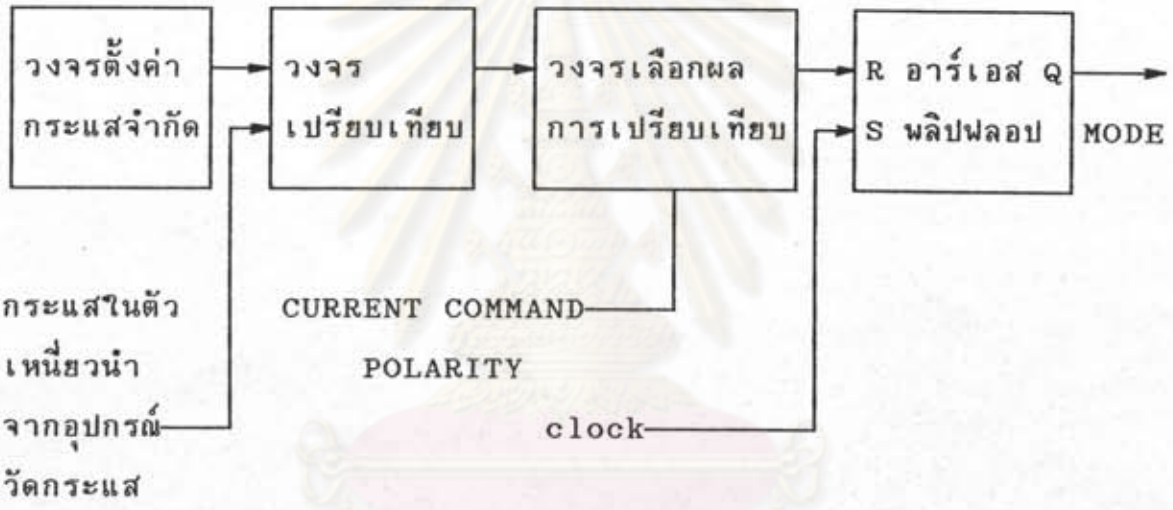
3.1.2.4 วงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อยชดเชยแบบพอดี ทำหน้าที่สร้างสัญญาณฟันเลื่อยเพื่อนำไปลดขนาดของสัญญาณควบคุมกระแสในตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง การใช้สัญญาณฟันเลื่อยที่มีขนาดความลาดชันที่เหมาะสมเป็นสิ่งจำเป็นต่อเสถียรภาพของวงจรควบคุมกระแสในตัวเหนี่ยวนำเมื่อวัฏจักรการทำงานของสวิตช์มากกว่า 0.5 นอกจากนี้แล้วสัญญาณดังกล่าวจะทำให้กระแสของตัวเหนี่ยวนำเข้าสู่สถานะอยู่ตัวเร็วที่สุด เมื่อสัญญาณฟันเลื่อยดังกล่าวมีความลาดชันเท่ากับความลาดชันของกระแสในตัวเหนี่ยวนำซึ่งแปรผันตรงกับแรงดันออก ดังนั้นเพื่อให้วงจรควบคุมกระแสในตัวเหนี่ยวนำมีเสถียรภาพและเข้าสู่สถานะอยู่ตัวเร็วจึงใช้แรงดันออกของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงในการควบคุมความลาดชันของสัญญาณชดเชยดังกล่าว

3.1.2.5 วงจรสร้างสัญญาณนาฬิกา มีหน้าที่สร้างสัญญาณนาฬิกาเพื่อกำหนดความถี่ของการทำงานของสวิตช์ การเริ่มนำกระแสของกลุ่มสวิตช์ที่จะทำให้กระแสในตัวเหนี่ยวนำเพิ่มจะถูกกำหนดโดยด้านขึ้นของสัญญาณนาฬิกาดังกล่าว

3.1.2.6 วงจรกำหนดวัฏจักรงานสูงสุด มีหน้าที่สร้างพัลส์ที่ล้าหลังพัลส์ของสัญญาณนาฬิกาเพื่อจำกัดวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ไม่ให้เกินพิกัดสูงสุดของวัฏจักรงานที่กำหนดไว้ โดยที่สัญญาณออกของวงจรกำหนดวัฏจักรงานสูงสุดจะทำให้สวิตช์ที่นำกระแสโดยสัญญาณนาฬิกาหยุดนำกระแสเมื่อถึงวัฏจักรงานสูงสุดไม่ว่ากระแสในตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากับสัญญาณคำสั่งกระแสหรือไม่ก็ตาม ให้ชื่อสัญญาณออกจากวงจรนี้ว่า MD (maximum duty)

3.1.2.7 วงจรกำเนิดสัญญาณเลือกลำดับการทำงานของสวิตช์ วงจรนี้ทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณที่ใช้ในการกำหนดลำดับการทำงานของสวิตช์ โดยในภาวะปกติจะควบคุมให้วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงมีลำดับการทำงานของสวิตช์เป็นแบบ limited unipolar เพื่อลดขนาดการกระเพื่อมของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ แต่ในกรณีที่วงจรไม่สามารถจำกัดกระแสในตัวเหนี่ยวนำให้มีค่าเท่ากับพิกัดสูงสุดของสัญญาณคำสั่งกระแสในตัวเหนี่ยวนำแล้ว วงจรกำเนิดสัญญาณเลือกลำดับการทำงานของสวิตช์จะควบคุมให้วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงมีลำดับการทำงานของสวิตช์เป็นแบบ bipolar เพื่อให้สามารถจำกัดกระแสในตัวเหนี่ยวนำได้ โดยในช่วงเวลาที่สวิตช์หยุดนำกระแสวงจรตรรกจะสั่งให้สวิตช์

ทุกตัวหยุดนำกระแสแทนที่จะคงสวิตช์ที่นำกระแสไว้ 1 ตัว เมื่อสวิตช์ทุกตัวหยุดนำกระแสแล้วกระแสในตัวเหนี่ยวนำจะไหลผ่านไดโอดแทน วงจรกำเนิดสัญญาณเลือกลำดับการทำงานของสวิตช์จะเลือกลำดับการทำงานของสวิตช์เป็นแบบ bipolar เมื่อกระแสในตัวเหนี่ยวนำมีค่ามากกว่าพิกัดสูงสุดของกระแสในตัวเหนี่ยวนำเล็กน้อยและจะเปลี่ยนการทำงานกลับเป็นแบบ limited unipolar เมื่อกระแสในตัวเหนี่ยวนำลดลงมาต่ำกว่าพิกัดสูงสุดของค่าอ้างอิงของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ วงจรกำเนิดสัญญาณเลือกลำดับการทำงานของสวิตช์มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยที่วงจรย่อยแต่ละส่วนจะมีหน้าที่และลักษณะการทำงานดังนี้คือ



รูปที่ 3.7 บล็อกไดอะแกรมวงจรกำเนิดสัญญาณเลือกลำดับการทำงานของสวิตช์

3.1.2.7.1 <u>วงจรตั้งค่ากระแสจำกัด</u>
เป็นวงจรที่สร้างแรงดันไฟตรงที่คงค่าเพื่อเป็นค่าจำกัดของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ เนื่องจากกระแสในตัวเหนี่ยวอาจจะเป็นบวกหรือลบก็ได้ ดังนั้นจึงต้องมีแรงดันบวกสำหรับวงจรเปรียบเทียบเมื่อกระแสในตัวเหนี่ยวนำเป็นบวกและแรงดันลบสำหรับวงจรเปรียบเทียบเมื่อกระแสในตัวเหนี่ยวนำเป็นลบ

3.1.2.7.2 <u>วงจรเปรียบเทียบ</u> ประกอบด้วยวงจรเปรียปเทียบ 2 ชุด ซึ่งจะทำหน้าที่เปรียบเทียบค่าจำกัดของกระแสจากวงจรตั้งค่ากระแสจำกัดกับสัญญาณกระแสในตัวเหนี่ยวนำจากอุปกรณ์วัดกระแส

3.1.2.7.3 วงจรเลือกผลการเปรียบเทียบ เป็นวงจรที่ใช้สำหรับเลือกผลการเปรียบเทียบจากวงจรเปรียบเทียบย่อย เพื่อนำไปใช้ในการกำหนดลำดับการทำงานของสวิตช์ โดยมีสัญญาณ CURRENT COMMAND POLARITY เป็นตัวกำหนดเงื่อนไขในการเลือกสัญญาณออกของวงจรกำเนิดสัญญาณเลือกลำดับการทำงานของสวิตช์ ให้ชื่อว่า MODE จะถูกส่งต่อไปยังวงจรตรรก เพื่อเปลี่ยนลำดับการทำงานของสวิตช์เป็น bipolar mode เมื่อสัญญาณ MODE เป็นศูนย์ นอกจากนี้สัญญาณ MODE จะถูกดำเนินงานทางตรรกแบบ AND กับสัญญาณ PRO จากวงจรป้องกัน เป็น สัญญาณ PROTECTION ถ้าสัญญาณ PROTECTION เป็นศูนย์ เนื่องจากวงจรป้องกันทำงาน สัญญาณ PROTECTIONจะมีการค่าเป็นศูนย์ตลอดจนกว่าจะมีการ reset จากภายนอก

3.1.3 วงจรเปรียบเทียบและคุมค่า เป็นวงจรที่ทำหน้าที่ควบคุมให้กระแสออกหรือแรงดันออกของวงจรขยายเชอร์โวกระแสตรงมีค่าเท่ากับค่ากระแสหรือค่าแรงดันตั้งค่า ขึ้นอยู่กับว่าจะต้องการควบคุมให้วงจรขยายเชอร์โวกระแสตรงทำงานในภาคกระแสหรือภาคแรงดัน ทำได้โดยการเปรียบเทียบค่าตั้งกับค่าของตัวแปรทางด้านออกที่ได้จากวงจรจัดแจงสัญญาณป้อนกลับและจัดแจงสัญญาณความคลาดเคลื่อนเพื่อใช้เป็นสัญญาณควบคุมกระแสในตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง สามารถควบคุมกระแสหรือแรงดันออกของวงจรขยายเชอร์โวกระแสตรงได้โดยการควบคุมผ่านกระแสในตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง เนื่องจากทั้งกระแสและแรงดันออกของวงจรขยายเชอร์โวกระแสตรงจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับกระแสในตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง โดยในสถานะอยู่ตัวค่าเฉลี่ยของกระแสออกของวงจรขยายเชอร์โวกระแสตรงจะมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ ส่วนแรงดันออกของวงจรขยายเชอร์โวกระแสตรงจะมีค่าเท่ากับ impedance ของโหลดคูณกับกระแสออกของวงจรขยายเชอร์โวกระแสตรง ดังนั้นในการควบคุมกระแสหรือแรงดันออกของวงจรขยายเชอร์โวกระแสตรง วงจรเปรียบเทียบและคุมค่ากระแสหรือแรงดันออกของวงจรขยายเชอร์โวกระแสตรงจะปรับค่าสัญญาณควบคุมกระแสในตัวเหนี่ยวนำเพื่อที่จะทำให้กระแสหรือแรงดันออกของวงจรขยายเชอร์โวกระแสตรงมีค่าเท่ากับค่าตั้งของกระแสหรือแรงดันจากวงจรตั้งค่า ฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรคุมค่าจะมีผลต่อลักษณะสมบัติและเสถียรภาพของวงจรขยายเชอร์โวกระแสตรงเป็นอันมาก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องออกแบบ

ฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรเปรียบเทียบและคุมค่าให้เหมาะสมกับลักษณะของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงและโหลดของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรง ตลอดจนชนิดของตัวแปรด้านออก(กระแสหรือแรงดันออก) ที่ต้องการควบคุม

3.1.4 วงจรตั้งค่า เป็นวงจรที่ทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณตั้งค่าของตัวแปรด้านออกที่ต้องการควบคุมสัญญาณตั้งค่าที่ใช้จะเป็นแรงดัน 0-10 โวลต์ สัญญาณออกของวงจรตั้งค่าจะป้อนให้กับวงจรเปรียบเทียบและคุมค่า

3.1.5 วงจรจัดแจงสัญญาณป้อนกลับ ทำหน้าที่วัดค่าของกระแสหรือแรงดันด้านออกและจัดแจงให้มีลักษณะของสัญญาณที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับสัญญาณตั้งค่า

3.1.6 อุปกรณ์วัดกระแส ทำหน้าที่วัดค่ากระแสในตัวเหนี่ยวนำและจัดแจงให้อยู่ในรูปของแรงดันเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับสัญญาณตั้งค่า

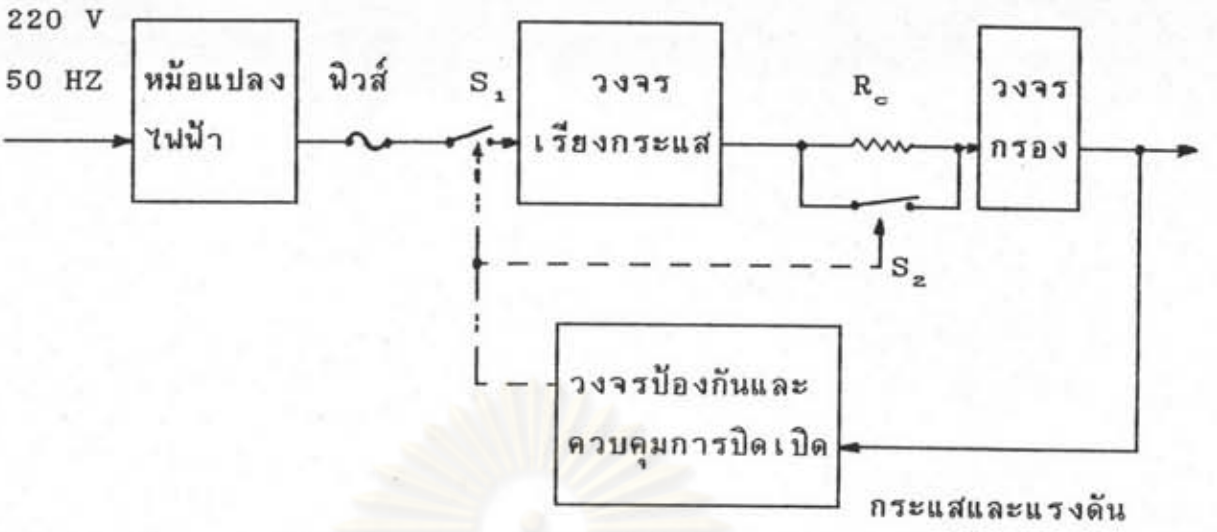
3.1.7 แหล่งจ่ายไฟตรง เป็นวงจรที่ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงโดยแบ่งเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ แหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคกำลัง และแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคควบคุม แต่ละส่วนจะมีหน้าที่การทำงานและลักษณะของวงจรดังต่อไปนี้คือ

3.1.7.1 แหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคกำลัง ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อจ่ายพลังงานให้กับภาคกำลังของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง มีส่วนประกอบต่างๆดังรูปที่ 3.8 ซึ่งแต่ละส่วนมีหน้าที่ดังนี้

3.1.7.1.1 หม้อแปลงไฟฟ้า ทำหน้าที่แปลงระดับของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากสายส่งให้เหมาะสมกับระดับแรงดันด้านเข้าของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงนอกจากนี้ยังอาจจะทำหน้าที่แยกโดดวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงออกจากสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับ

3.1.7.1.2 วงจรเรียงกระแส ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟกระแสสลับจากหม้อแปลงให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วแรงดันออกของวงจรเรียงกระแสจะมีองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับอยู่มาก

3.1.7.1.3 วงจรกรอง จะทำหน้าที่กรององค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับออกจากไฟฟ้ากระแสตรงที่จะจ่ายให้กับวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ทำให้แรงดันออกของวงจรกรองมีการกระเพื่อมที่น้อยลงโดยให้มีการกระเพื่อมน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณไฟฟ้ากระแสตรง

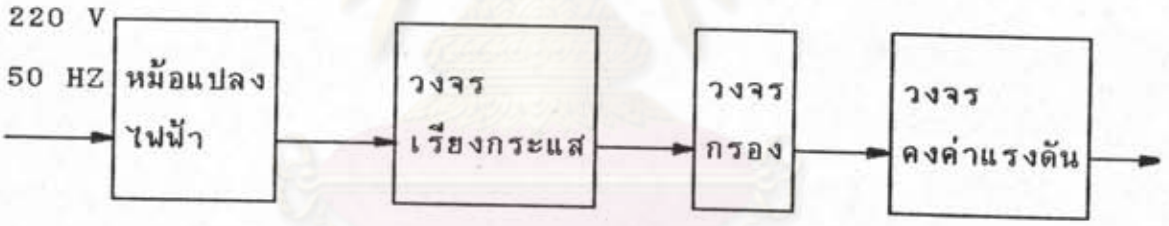


รูปที่ 3.8 บล็อกไดอะแกรมของแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคกำลัง

3.1.7.1.4 <u>วงจรป้องกันและวงจรควบคุมการปิดเปิด</u> วงจรป้องกันมีหน้าที่ตรวจสอบแรงดันออกและกระแสออกของแหล่งจ่ายสำหรับภาคกำลังว่ามีค่าผิดปกติหรือไม่ เช่น แรงดันออกมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าพิกัดหรือกระแสออกมีค่ามากกว่าพิกัด ถ้ามีเหตุผิดปกติก็จะสั่งให้วงจรควบคุมการปิดเปิดทำการเปิดวงจรสวิทช์ S_1 เพื่อตัดไฟสลับออกจากแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคกำลัง นอกจากนี้วงจรป้องกันจะทำหน้าที่ควบคุมให้สวิตช์ทุกตัวของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงหยุดนำกระแส การเกิดแรงดันออกของแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคกำลังสูงเกินพิกัดนั้น อาจจะเกิดจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากสายส่งสูงเกินพิกัดหรืออาจจะเกิดจากการคืนพลังงานจากมอเตอร์ในตอนเบรกหรือกลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์ ดังนั้นเพื่อป้องกันการทำงานผิดพลาดของวงจรป้องกันแรงดันเกินพิกัดจะมีการหน่วงเวลาการทำงานของวงจรป้องกันแรงดันเกินพิกัดด้วยกล่าวคือ เมื่อแรงดันออกสูงถึงระดับที่กำหนดไว้วงจรป้องกันก็จะทำหน้าที่ต่อความต้านทานขนานกับแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคกำลังเพื่อเปลี่ยนพลังงานจลน์จากมอเตอร์ให้เป็นพลังงานความร้อน อันจะเป็นผลทำให้แรงดันออกของแหล่งจ่ายพลังงานลดลงก่อนที่วงจรป้องกันแรงดันเกินพิกัดจะทำงาน แต่ถ้าการต่อความต้านทานดังกล่าวไม่สามารถจะทำให้แรงดันลดลงได้ในเวลาที่กำหนดอันเนื่องมาจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากสายส่งสูงเกินพิกัดหรือมีการคืนพลังงานมากเกินไปวงจรป้องกันแรงดันออกเกินพิกัดจะทำงานโดยการตัดไฟฟ้ากระแสสลับจากสายส่งออกไปโดยสวิตช์ S_1 นอกจากวงจรป้องกันดังที่

กล่าวมาแล้วยังมีวงจรป้องกันกระแสกระชากในตอนเปิดเครื่อง โดยสวิตช์ S_2 จะเปิดวงจรในตอนเริ่มเปิดเครื่อง เพื่อให้ R_c ทำหน้าที่จำกัดกระแสที่ใช้ในการประจุตัวเก็บประจุของวงจรกรองจนมีค่าเข้าสู่แรงดันในสถานะอยู่ตัวจากนั้นวงจรควบคุมจะสั่งให้สวิตช์ S_2 ปิดวงจรเพื่อไม่ให้เกิดกำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสโหลดไหลผ่านตามต้านทาน R_c

3.1.7.2 แหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคควบคุม ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อจ่ายให้แก่วงจรควบคุมต่างๆในรูปที่ 3.1,3.2 และ 3.8 รวมทั้งวงจรขับนำสวิตช์ของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง มีส่วนประกอบต่างๆดังแสดงในรูปที่ 3.9 หม้อแปลงไฟฟ้า วงจรเรียงกระแสและวงจรกรองจะมีหน้าที่เช่นเดียวกันกรณีของแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคกำลังเพียงแต่ระดับกำลังจะต่ำกว่าและมีจำนวนชุดของขดลวดทุติยภูมิมากกว่า สำหรับวงจรคงค่าแรงดันนั้นจะทำหน้าที่รักษาแรงดันออกให้มีค่าคงที่ตามความต้องการของโหลดแต่ละชุด วงจรคงค่าแรงดันอาจจะเป็นวงจรแบบเชิงเส้นหรือวงจรแบบสวิตชิงก็ได้ แต่ได้ใช้วงจรแบบเชิงเส้นสำหรับงานวิจัยนี้



รูปที่ 3.9 บล็อกไดอะแกรมของแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคควบคุม

3.2 การออกแบบวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงกำลัง

จากโครงสร้างของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงดังได้กล่าวมาแล้วจะได้ว่าวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงอาจจะจำแนกออกได้เป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ ภาคกำลัง และ ภาคควบคุม สำหรับแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงและวงจรป้องกันมักจะแทรกอยู่ทั้งในภาคกำลังและภาคควบคุม ในหัวข้อต่อไปนี้จะกล่าวถึงเฉพาะการออกแบบค่าของอุปกรณ์ในภาคกำลัง เพื่อให้สามารถหาฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรภาคกำลังซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการออกแบบวงจรเปรียบและคุมค่าทั้งในกรณีที่

วงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงทำงานในภาคกระแสและภาคแรงดัน การวิเคราะห์การทำงานของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงจำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์ เนื่องจากการทำงานของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงเป็นแบบไม่เชิงเส้นซึ่งยากต่อการวิเคราะห์โดยการคำนวณด้วยมือ สำหรับการออกแบบค่าอุปกรณ์อื่น ๆ และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ จะกล่าวถึงในบทต่อไป ในการออกแบบวงจรขยายเซอร์โวนั้นจะต้องทราบข้อกำหนดของโหลดที่จะนำมาใช้ร่วมกับวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงที่สร้างขึ้นด้วย ดังได้กล่าวมาแล้วว่า วงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงจะใช้ในการขับนำมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรง แต่เนื่องจากในห้องปฏิบัติการไม่มีมอเตอร์ดังกล่าว และนอกจากนี้มอเตอร์เซอร์โวนั้นมีราคาแพงและหายากในประเทศ ดังนั้นจึงต้องใช้มอเตอร์กระแสตรงแบบธรรมดาที่มีในห้องปฏิบัติการในการทดสอบวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงกระแสตรงที่สร้างขึ้น มอเตอร์ที่เลือกใช้เป็นมอเตอร์ขนาด 3.5 แรงม้า ซึ่งมีพิกัดทางไฟฟ้า ดังนี้คือ (E1 - E8)

E1 แรงดันอาร์เมเจอร์	220	โวลต์
E2 แรงดันที่วงจรสนาม	220	โวลต์
E3 กระแสอาร์เมเจอร์	15.6	แอมแปร์
E4 กระแสสนาม	0.72	แอมแปร์
ความเร็วรอบ	1400	รอบต่อนาที
E5 ความเหนี่ยวนำของขดลวดในวงจรอาร์เมเจอร์ (L_a)	13.65	มิลลิเฮนรี
E6 ความต้านทานในวงจรอาร์เมเจอร์ (R_a)	1.16	โอห์ม
E8 ค่าคงที่ในการสร้างแรงดันอาร์เมเจอร์ (K1)	1.5	โวลต์/(เรเดียน/วินาที)
หรือ ค่าคงที่ในการสร้างแรงบิด (K1)	1.5	นิวตันเมตร/แอมแปร์

จะใช้มอเตอร์กระแสตรงในการขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งทำให้สามารถสร้างโหลดของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงโดยการปรับโหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ระบบเชิงกลทั้งมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีคุณสมบัติเชิงกลดังนี้คือ

M1 ค่าคงที่เนื่องจากความเฉื่อย (J)	0.0796	กิโลกรัม (เมตร)^2

M2 ค่าคงที่เนื่องจากความฝืด (B) 0.0189 นิวตัน.เมตร.วินาที/เรเดียน

3.2.1 <u>การเลือกความถี่ในการสวิตช์</u> ความถี่ในการสวิตช์ควรมีค่าสูงกว่าเสียงที่คนได้ยินเพื่อลดปัญหาเสียงรบกวนจากการทำงานของวงจร ลดขนาดของสัญญาณฟันเลื่อยชดเชยและลดขนาดของวงจรกรอง นอกจากนี้ยังมีผลต่อแถบความถี่ของวงจรด้วย แต่ถึงอย่างไรก็ตามความถี่ในการสวิตช์ก็ไม่ควรสูงจนเกินไป เพราะจะทำให้เกิดการสูญเสียในสวิตช์มากเกินไปในช่วงการสวิตช์และปัญหาสัญญาณรบกวน ดังนั้นจึงเลือกความถี่ในการสวิตช์ให้มีค่าประมาณเท่ากับ 20 กิโลเฮิรตซ์

3.2.2 <u>การออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำ (L) ของวงจรกรอง LC แบบผ่านต่ำ</u> ขนาดของตัวเหนี่ยวนำจะถูกกำหนดด้วยค่ากระเพื่อมของกระแสในตัวเหนี่ยวนำและผลคูณของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำและเวลา (volt-sec) ซึ่งเงื่อนไขทั้งสองจะขึ้นกับความถี่ในการสวิตช์แรงดันเข้า, วัฏจักรงานและรูปแบบการทำงานของวงจรบริดจ์ จะกำหนดให้การกระเพื่อมของกระแสในตัวเหนี่ยวนำสูงสุดเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์ของกระแสออกสูงสุด ดังนั้นสำหรับกระแสออกสูงสุด 20 แอมแปร์ การกระเพื่อมของกระแสในตัวเหนี่ยวนำสูงสุด ควรจะมีค่าประมาณ 3 แอมแปร์ สำหรับวงจรทอนระดับการกระเพื่อมของกระแสในตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าสูงสุดเมื่อวัฏจักรงานของสวิตช์เท่ากับ 0.5

ดังนั้นขนาดของตัวเหนี่ยวนำจะคำนวณได้จากสมการ 3.1

$$L = \frac{V_s}{4xfx\Delta i_L} \qquad (3.1)$$

เมื่อแรงดันของแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคกำลัง(V_s) มีค่าเท่ากับ 150 โวลต์
(ตามการเลือกขนาดแรงดันในหัวข้อที่ 4.7.1)
ความถี่ในการทำงานของสวิตช์ (f) มีค่าเท่ากับ 20 กิโลเฮิรตซ์
การกระเพื่อมของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ (Δi_L) มีค่าเท่ากับ 3 แอมแปร์

แทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ลงในสมการ 3.1 จะได้ค่าของตัวเหนี่ยวนำ

$$L = \frac{150}{4x20x10^{3}x3} = 0.625 \text{ มิลลิเฮนรี}$$

แต่เพื่อความเหมาะจึงเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำ เท่ากับ 0.7 มิลลิเฮนรี จากค่าตัวเหนี่ยวนำที่เลือกสามารถคำนวณการกระเพื่อมสูงสุดของกระแสในตัวเหนี่ยวนำได้เท่ากับ 2.68 แอมแปร์

3.2.3 <u>การออกแบบค่าตัวเก็บประจุ (C) ของวงจรกรอง LC แบบผ่านต่ำ</u> เมื่อได้กำหนดค่าของตัวเหนี่ยวนำโดยใช้เงื่อนไขของการกระเพื่อมของกระแสในตัวเหนี่ยวนำแล้วการเลือกค่าของตัวเก็บประจุจะมีผลต่อทั้งความถี่เรโซแนนซ์ (resonance frequency) ของวงจรกรองและการกระเพื่อมของแรงดันออกของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงด้วย ดังนั้นในการออกแบบตัวเก็บประจุจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงเงื่อนไขดังกล่าวพร้อมกัน

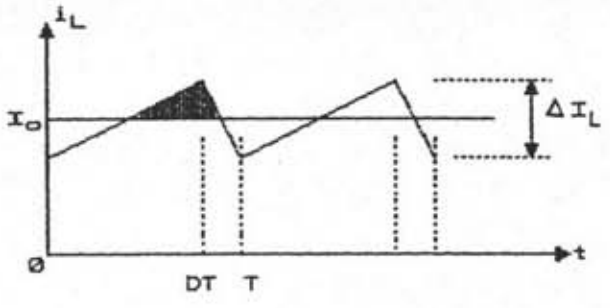
3.2.3.1 <u>การออกแบบค่าตัวเก็บประจุ (C) เมื่อใช้เงื่อนไขความถี่เรโซแนนซ์</u> เนื่องจากต้องการให้วงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงเมื่อทำงานในภาคแรงดันจะมีแถบความถี่มากกว่า 500 เฮิรตซ์ ดังนั้นจึงต้องออกแบบให้ความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรกรอง LC แบบต่ำผ่านมีค่ามากกว่า 500 เฮิรตซ์ ทั้งนี้เพราะช่วงการส่งผ่านสัญญาณของวงจรกรอง LC แบบผ่านต่ำจะมีค่าใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์ จากเงื่อนไขนี้ขนาดของตัวเก็บประจุจะคำนวณได้จากสมการ 3.2

$$C \leqslant \frac{1}{(2x\pi xf)^2 xL} \qquad (3.2)$$

แทนค่า f = 500 เฮิรตซ์ , L = 0.7 มิลลิเฮนรี ลงในสมการ 3.20 จะได้ว่าตัวเก็บประจุควรมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 144.74 ไมโครฟารัด

3.2.3.2 <u>การออกแบบค่าตัวเก็บประจุโดยใช้เงื่อนไขการกระเพื่อมของแรงดันออก</u> การใช้เงื่อนไขการกระเพื่อมของแรงดันออกในการออกแบบค่าตัวเก็บประจุนั้นจะใช้สมมุติฐานว่า กระแสออกมีค่ากระเพื่อมน้อยมากจนถือได้ว่ามีค่าคงที่ ดังแสดงในรูป 3.5 กระแสที่ไหลเข้าตัวเก็บประจุ (i_c) จะมีค่าเท่ากับผลต่างของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ (i_L) และกระแสออก (I_o) ตามสมการ 3.3

$$i_c = i_L - I_o \qquad (3.3)$$



รูปที่ 3.10 ลักษณะของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ

จะเห็นได้ว่าเมื่อ i_L มีค่ามากกว่า I_o กระแสจะไหลเข้าสู่ตัวเก็บประจุ แต่เมื่อ i_L มีค่าน้อยกว่า I_o กระแสจะไหลออกจากตัวเหนี่ยวนำ โดยในสถานะอยู่ตัวกระแสเฉลี่ยของตัวเก็บประจุจะมีค่าเท่ากับศูนย์ กระแสที่ไหลเข้าและออกจากตัวเก็บประจุจะทำให้เกิดการกระเพื่อมของแรงดัน ซึ่งจะมีค่าขึ้นอยู่กับการกระเพื่อมของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ(Δi_L), ความถี่ในการทำงานของสวิตช์(f)และขนาดตัวเก็บประจุ(C)ของวงจรกรองที่ใช้ ดังนั้นถ้าทราบค่าการกระเพื่อมของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ(Δi_L) , ความถี่ในการทำงานของสวิตช์(f) และค่าพิกัดของการกระเพื่อมของแรงดันออก(Δv_o) จะทำให้สามารถคำนวณหาขนาดของตัวเก็บประจุได้ตามสมการ 3.4

$$C = \frac{\Delta i_L}{8xf*\Delta v_o} \qquad (3.4)$$

เมื่อกำหนดให้การกระเพื่อมของแรงดันออก (Δv_o) สูงสุดเท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์ของแรงดันออกสูงสุด (v_{omax})ซึ่งมีค่าเท่ากับ 100 โวลต์ ดังนั้นการกระเพื่อมของแรงดันออก (Δv_o) ควรมีค่าสูงสุดเท่ากับ 5 โวลต์ และจาก Δi_L = 3 แอมแปร์, f = $20x10^3$ เฮิรตซ์จะได้

$$C = \frac{3}{8x20x10^3x5} = 3.75 \text{ ไมโครฟารัด}$$

จากข้อกำหนดของการกระเพื่อมของแรงดันออกและแถบความถี่ที่ส่งผ่านสัญญาณของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรง จึงควรใช้ตัวเก็บประจุค่าระหว่าง 3.75 ถึง 144.74 ไมโครฟารัด และได้เลือกใช้ตัวเก็บประจุเท่ากับ 54 ไมโครฟารัดโดยมีค่าประมาณ 0.3 เท่าของค่าสูงสุด เพื่อเป็นการเผื่อในส่วนของแถบกว้างทางความถี่ ซึ่งจะลดลงเมื่อมีการป้อนกลับเนื่องจากผลตอบเชิงความถี่ของวงจรคุมค่า

3.2.4 <u>การกำหนดค่าอัตราขยายของอุปกรณ์วัดกระแส</u> การควบคุมกระแสในตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงนั้น จะใช้แรงดันขนาด 0 ถึง 10 โวลต์เป็นสัญญาณคำสั่งกระแสของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ 0 ถึง 30 แอมแปร์ ดังนั้นเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบกระแสในตัวเหนี่ยวนำกับสัญญาณคำสั่งกระแสของกระแสในตัวเหนี่ยวนำได้ จึงต้องมีอุปกรณ์วัดกระแสซึ่งทำหน้าที่ตรวจจับกระแสในตัวเหนี่ยวนำและปรับแต่งให้เป็นสัญญาณชนิดเดียวกันกับสัญญาณคำสั่งกระแส เนื่องจากใช้แรงดัน 10 โวลต์แทนกระแสในตัวเหนี่ยวนำ 30 แอมแปร์ ดังนั้น อัตราขยายของอุปกรณ์วัดกระแสจะต้องมีหน่วยเป็นความต้านทาน (R_f) ซึ่งมีขนาดตามสมการ 3.5

$$R_f = \frac{V_f}{i_L} = \frac{10}{30} = 0.33 \quad \text{โอห์ม} \qquad (3.5)$$

อัตราขยายของอุปกรณ์วัดกระแสจะเป็นผลคูณของอัตราขยายของอุปกรณ์ตรวจจับกระแสและอัตราขยายของวงจรขยายสัญญาณที่ใช้ในการขยายสัญญาณออกของอุปกรณ์ตรวจจับกระแสเพื่อใช้ในการป้อนกลับไปเปรียบเทียบกับสัญญาณคำสั่งกระแสอุปกรณ์ตรวจจับกระแสโดยทั่วไปจะเป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนกระแสให้เป็นแรงดัน ในการตรวจจับกระแสในตัวเหนี่ยวนำนี้ จะใช้ความต้านทานค่า 0.02 โอห์ม ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งเมื่อกระแสสูงสุด30แอมแปร์ไหลผ่านตัวต้านทานดังกล่าวจะมีแรงดันคร่อมตัวต้านทานเท่ากับ 0.60 โวลต์ สำหรับกระแสพิกัด 20 แอมแปร์จะมีแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานเท่ากับ 0.4 โวลต์และมีกำลังสูญเสียเท่ากับ 8 วัตต์ เ พื่อให้ได้แรงดันป้อนกลับ 10 โวลต์เมื่อกระแสในตัวเหนี่ยวนำมีค่า 30 แอมแปร์ ต้องใช้วงจรขยายเท่ากับ 16.7 เพื่อขยายแรงดัน

0.60 โวลต์ให้เป็นแรงดัน 10 โวลต์เพื่อใช้ในการป้อนกลับ จะเห็นได้ว่าผลคูณของอัตราขยาย (16.7) และความต้านทาน 0.02 โอห์มจะมีค่าเท่ากับ 0.33 โอห์มเท่ากับค่าของ R_f ซึ่งคำนวณได้จากสมการ 3.5

3.3 การออกแบบวงจรเปรียบเทียบและคุมค่า

3.3.1 การคำนวณหาฟังก์ชันโอนย้ายสำหรับสัญญาณขนาดเล็กระหว่างสัญญาณควบคุมกระแส ($\hat{v}_c$) กับสัญญาณออก ($\hat{v}_o$ หรือ $\hat{i}_o$)

ในการออกแบบวงจรคุมค่ากระแสออก (Current regulator) หรือวงจรคุมค่าแรงดันออก (Voltage regulator) ของวงจรขยายเชอร์โวกระแสตรงนั้นในเบื้องต้นจะใช้วงจรสมมูลแบบเชิงเส้นสำหรับสัญญาณขนาดเล็กในการออกแบบ จากนั้นจะใช้คอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์การทำงานของวงจรขยายเชอร์โวกระแสตรงเพื่อตรวจสอบการออกแบบอีกชั้นหนึ่ง ในการออกแบบฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรคุมค่ากระแสออกหรือวงจรคุมค่าแรงดันออกนั้นจะต้องทราบค่าฟังก์ชันโอนย้ายของกระแสออก ($\hat{i}_o$) ต่อสัญญาณควบคุมกระแส($\hat{v}_c$) หรือฟังก์ชันโอนย้ายของแรงดันออก ($\hat{v}_o$) ต่อสัญญาณควบคุมกระแส ($\hat{v}_c$) ตามลำดับ ค่าฟังก์ชันโอนย้ายทั้งสองของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง จะขึ้นอยู่กับความถี่ในการทำงานของสวิตช์ (f), ขนาดของตัวเหนี่ยวนำ(L) และตัวเก็บประจุ (C) ของวงจรกรอง, อัตราขยายของอุปกรณ์วัดกระแส (R_f) และวัฏจักรงานของสวิตช์ (D) จะเห็นได้ว่า ทั้ง f,L,C และ R_f จะมีค่าคงที่ตามที่ได้ออกแบบไว้แล้ว ส่วนวัฏจักรงานของสวิตช์จะมีค่าแปรไปตามจุดทำงานของวงจร โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 0.95 ดังนั้น จะคงค่าของตัวแปรของวัฏจักรงาน D และ D′ ไว้ เมื่อแทนค่าตัวแปรต่างๆในสมการต่อไปนี้

จากสมการ 2.37 และ 2.50 จะได้

$$W_c = \frac{2xf}{n.D'} = \frac{2xf}{1+D} = \frac{2x20x10^3}{1+D} = \frac{40x10^3}{1+D} \qquad (3.6)$$

จากสมการ 2.48, 2.54 และ 3.6 จะได้

$$-y_{zcn} = \frac{1}{0.33} \times \frac{1.16}{1 + s.(1 + D)/40x10^{3}} \qquad (3.7)$$

จากสมการ 2.54,2.61 และ 3.6 จะได้

$$y_{zzn} = \frac{1 + D/(1+D)}{0.7x10^{-3}x40x10^{3}/(1+D)} \times \frac{1.16}{1+s.(1+D)/40x10^{3}} \qquad (3.8)$$

จากสมการ 2.52 จะได้

$$s.C_{n}=s.C.R_{a} = sx54x10^{-6}x1.16 \qquad (3.9)$$

จากพิกัดของมอเตอร์จะได้ฐานต่างๆ สำหรับทำเป็นบรรทัดฐานดังนี้

ค่าฐานแรงดัน	V_{ao}	เท่ากับ 220	โวลต์
ค่าฐานกระแส	$I_{ao} = V_{ao}/R_{a}$	เท่ากับ 189.66	แอมแปร์
ค่าฐานของแรงบิด	$T_{o} = K_{1}.I_{ao}$	เท่ากับ 284.49	นิวตัน.เมตร
ค่าฐานความเร็ว	$W_{o} = 2.\pi x1400/60$	เท่ากับ 146.61	เรเดียนต่อวินาที

จากสมการค่าคงที่ของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของมอเตอร์ และฐานต่าง ๆ ในสมการ 2.19 จะเป็นดังนี้

$$T_{kn}=\frac{J.W_{o}}{T_{o}} = \frac{0.0796x146.61}{284.48} = 0.041 \text{ วินาที}$$

$$B_n = \frac{B.W_o}{T_o} = \frac{0.0189x146.61}{284.48} = 0.01$$

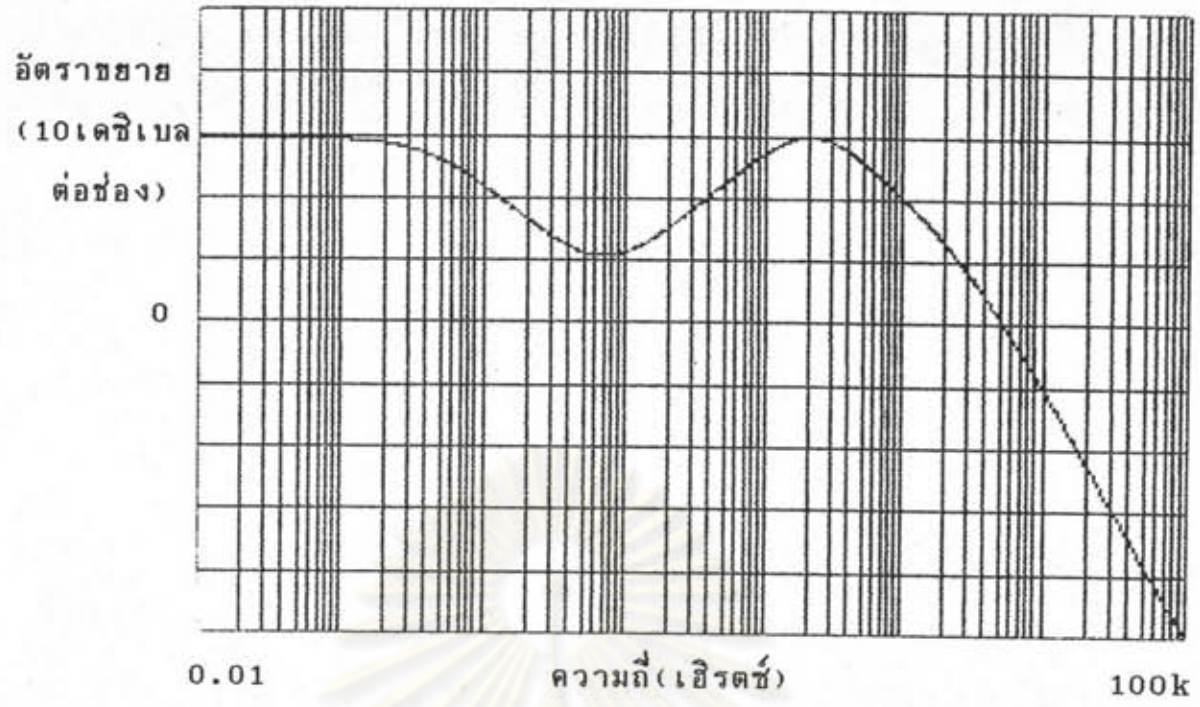
$$T_a = \frac{L_a}{R_a} = \frac{13.65x10^{-3}}{1.16} = 0.012 \text{ วินาที}$$

แทนค่าตัวแปรต่างๆที่หาได้ลงในสมการ 2.19,2.50 จะได้

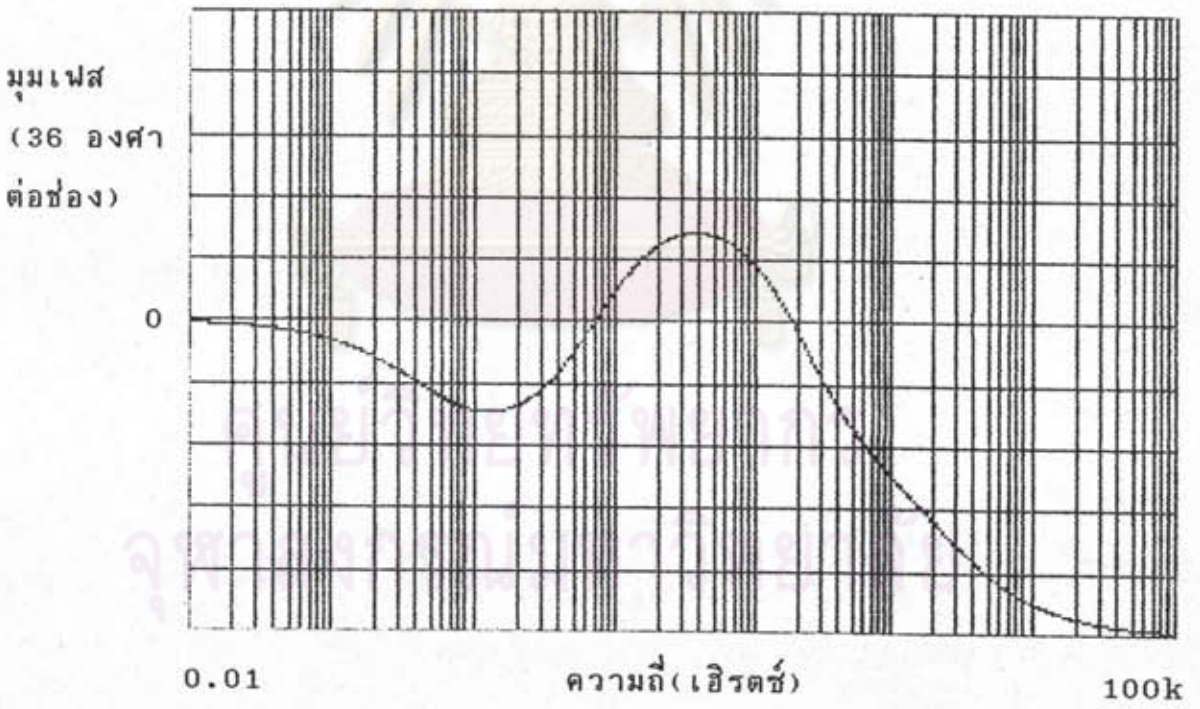
$$Y_{mn}(s) = \frac{sx0.041 + 1}{s^2x0.012x0.041+sx(0.012x0.01+0.041)+0.01+1} \quad (3.10)$$

นำค่าในสมการ 3.7,3.8,3.9 และ 3.10 แทนค่าลงในสมการ 2.56 และ 2.52 จะได้ฟังก์ชันโอนย้ายของ $(\hat{v}_o/\hat{v}_c)$ และ $(\hat{i}_o/\hat{v}_c)$ ตามลำดับ จากนี้ได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Mathcad คำนวณหาผลตอบทางความถี่ของ $(\hat{v}_o/\hat{v}_c)$ และ $(\hat{i}_o/\hat{v}_c)$ สำหรับวัฏจักรงาน (D) ที่ค่าต่างๆจาก 0.05 ถึง 0.95 ซึ่งเป็นวัฏจักรงานสูงสุดที่กำหนด จะได้ว่าที่วัฏจักรงานสูงสุด (D = 0.95) ทั้ง $(\hat{v}_o/\hat{v}_c)$ และ $(\hat{i}_o/\hat{v}_c)$ ต่างก็มีแถบความถี่แคบที่สุด รูปที่ 3.11 และ 3.12 แสดงผลการคำนวณของผลตอบทางความถี่ของ$(\hat{v}_o/\hat{v}_c)$ และ $(\hat{i}_o/\hat{v}_c)$ ที่วัฏจักรงาน 0.95

3.3.2 <u>การออกแบบฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรคุมค่า</u> วงจรคุมค่าจะเป็นอย่างไรก็ขึ้นกับฟังก์ชันโอนย้ายสำหรับสัญญาณขนาดเล็กระหว่างตัวแปรที่ควบคุมกับสัญญาณออกของวงจรคุมค่าดังในสมการ 2.56,2.58 สำหรับกรณีสัญญาณออกเป็นแรงดันออกและกระแสออกตามลำดับ โดยมีผลตอบสนองทางความถี่ดังแสดงในรูปที่ 3.11,3.12 จากรูปที่ 3.1 สามารถเขียนบล็อกไดอะแกรมการควบคุมสำหรับสัญญาณขนาดเล็กของวงจรขยายเชอร์โวกระแสตรงเมื่อทำงานในภาคแรงดันได้ดังรูปที่ 3.13

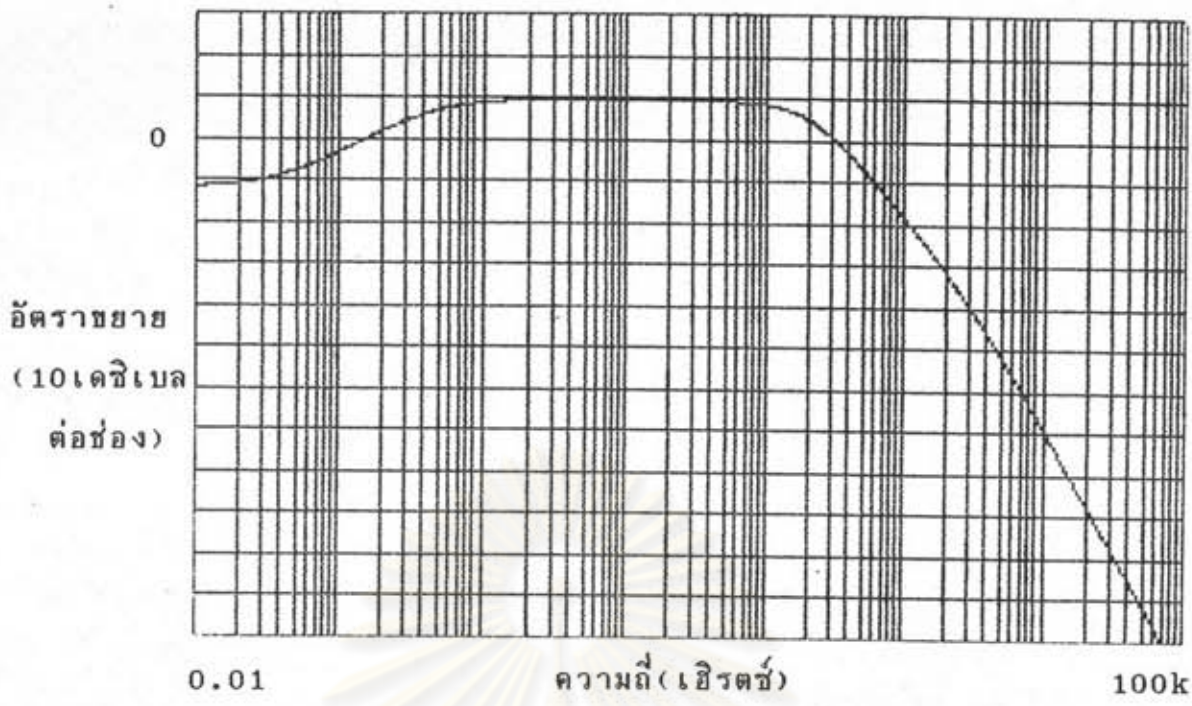


ก.อัตราขยาย

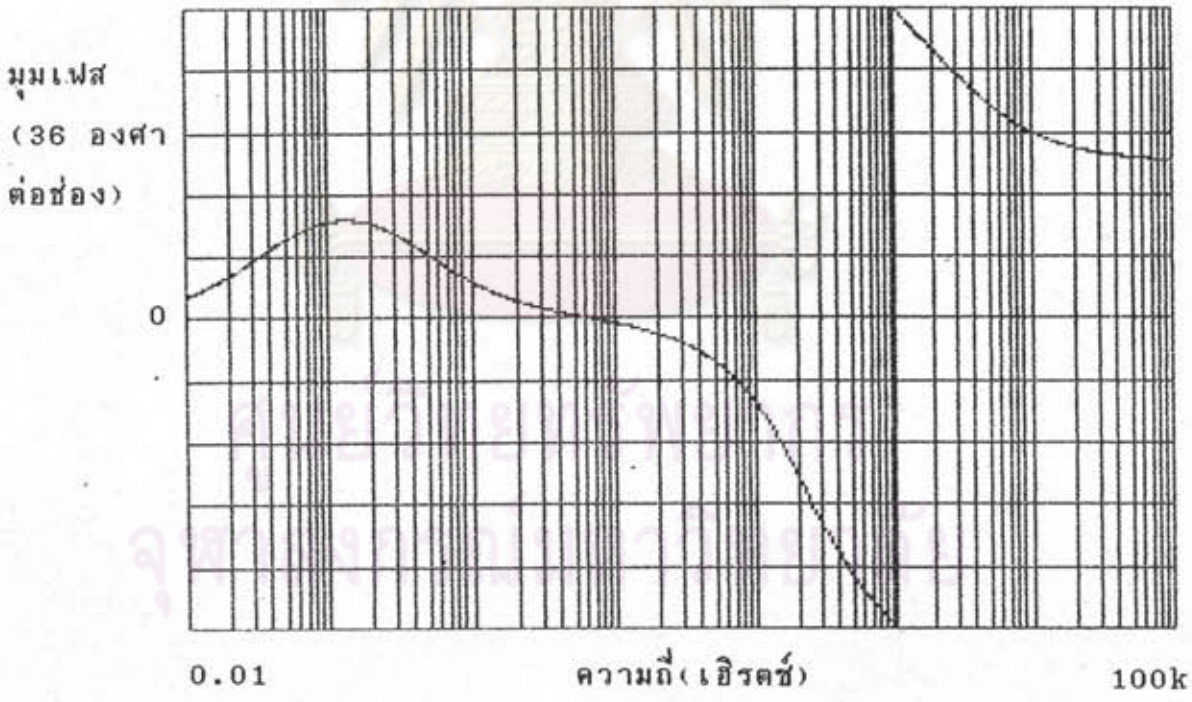


ข.มุมเฟส

รูปที่ 3.11 แสดงผลตอบทางความถี่ของ $(\hat{v}_o/\hat{v}_c)$ ที่วัฏจักรงาน 0.95

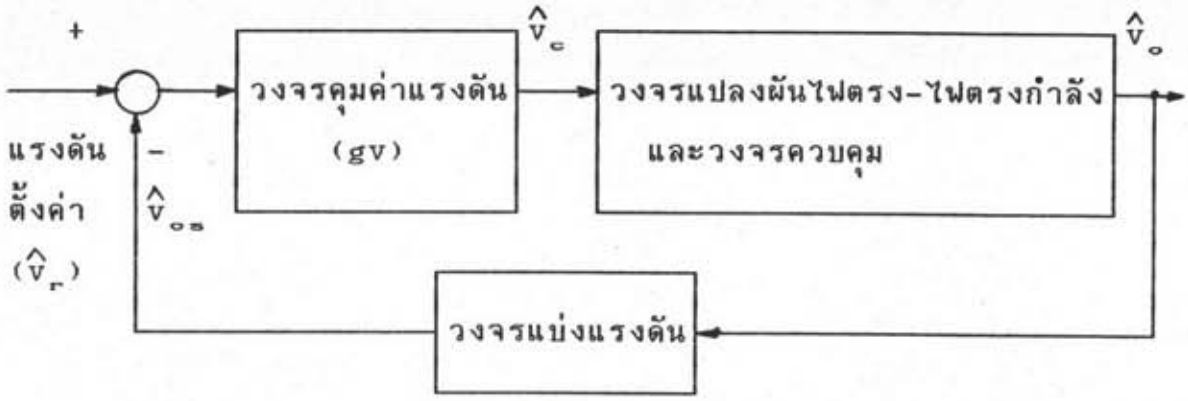


ก.อัตราขยาย



ข.มุมเฟส

รูปที่ 3.12 แสดงผลตอบทางความถี่ของ ($\hat{i}_o/\hat{v}_c$) ที่วัฏจักรงาน 0.95



รูปที่ 3.13 แสดงบล็อกไดอะแกรมการควบคุมสำหรับสัญญาณขนาดเล็ก ของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงเมื่อทำงานในภาคแรงดัน

ระบบที่แสดงในรูปที่ 3.13 จะมีอัตราขยายวงรอบแรงดัน (T_v) เป็นไปตามสมการ 3.11

$$T_v = \frac{\hat{v}_o}{\hat{v}_c} \cdot \frac{\hat{v}_{o\beta}}{\hat{v}_o} \cdot gv \qquad (3.11)$$

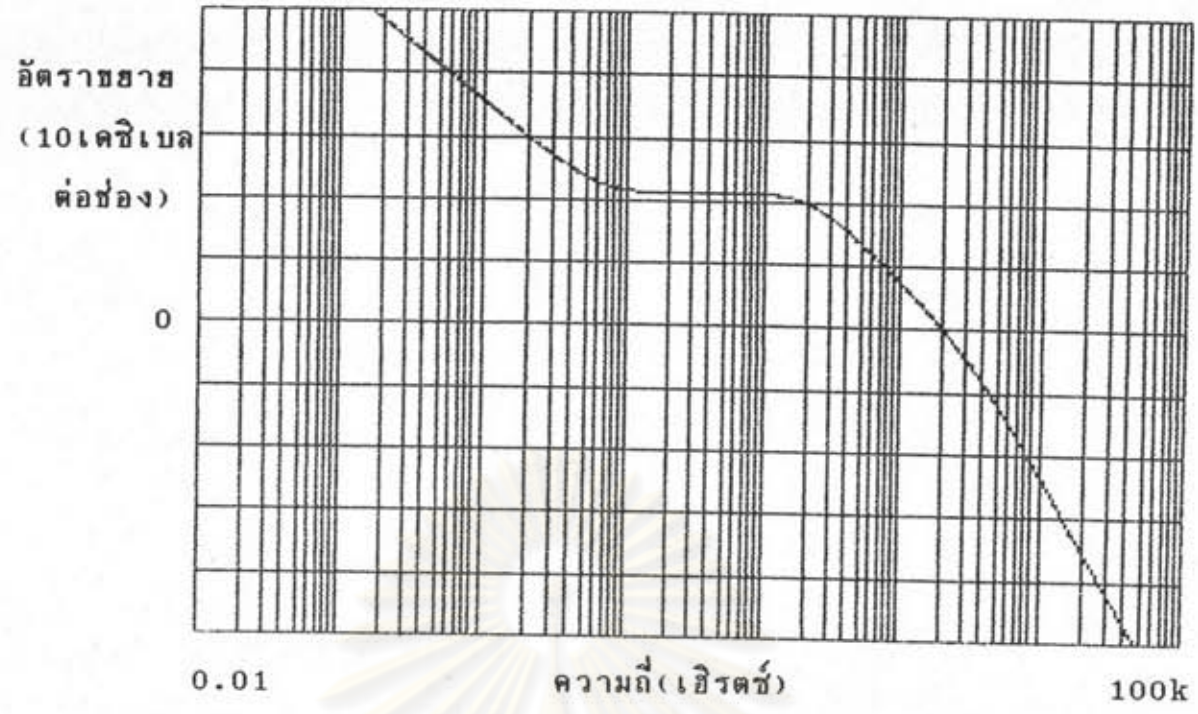
เมื่อ gv คืออัตราขยายของวงจรคุมค่าแรงดันออก

หลักการออกแบบให้ระบบที่มีการป้อนกลับทำงานอย่างมีเสถียรภาพ จะทำโดยออกแบบให้อัตราขยายวงรอบ T_v มีค่าน้อยกว่า 0 เดซิเบล เมื่อเฟสล้าหลังเท่ากับ 180° โดยให้ T_v มีอัตราขยายไฟตรงที่สูง มี phase margin มากกว่า 45 - 60 องศา มี gain margin มากกว่า 10 เดซิเบล และมี crossover frequency มากเพียงพอ(ขึ้นกับแถบความถี่ที่ต้องการ) [Katsuhiko, 1985;Middlebrook, 1989] จากสมการ 3.11 ค่า $\hat{v}_o/\hat{v}_c$ แสดงอยู่ในรูปที่ 3.11 ซึ่งเป็นกรณีที่มีแถบความถี่แคบที่สุด เทอม $\hat{v}_{o\beta}/\hat{v}_o$ เป็นอัตราการแบ่งแรงดันของวงจรแบ่งแรงดัน อัตราการแบ่งแรงดันนี้ขึ้นอยู่กับค่าสูงสุดของแรงดันตั้งค่าในรูปที่ 3.13 โดยทั่วไปแรงดันตั้งค่าจะมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 โวลต์ จึงเลือกให้มีแรงดันสูงสุดเท่ากับ 10 โวลต์เนื่องจากให้แรงดันออกมีค่าสูงสุดเท่ากับ 100 โวลต์ ดังนั้น $\hat{v}_{o\beta}/\hat{v}_o$ จึงควรมีค่าเท่ากับ 0.1 สำหรับ

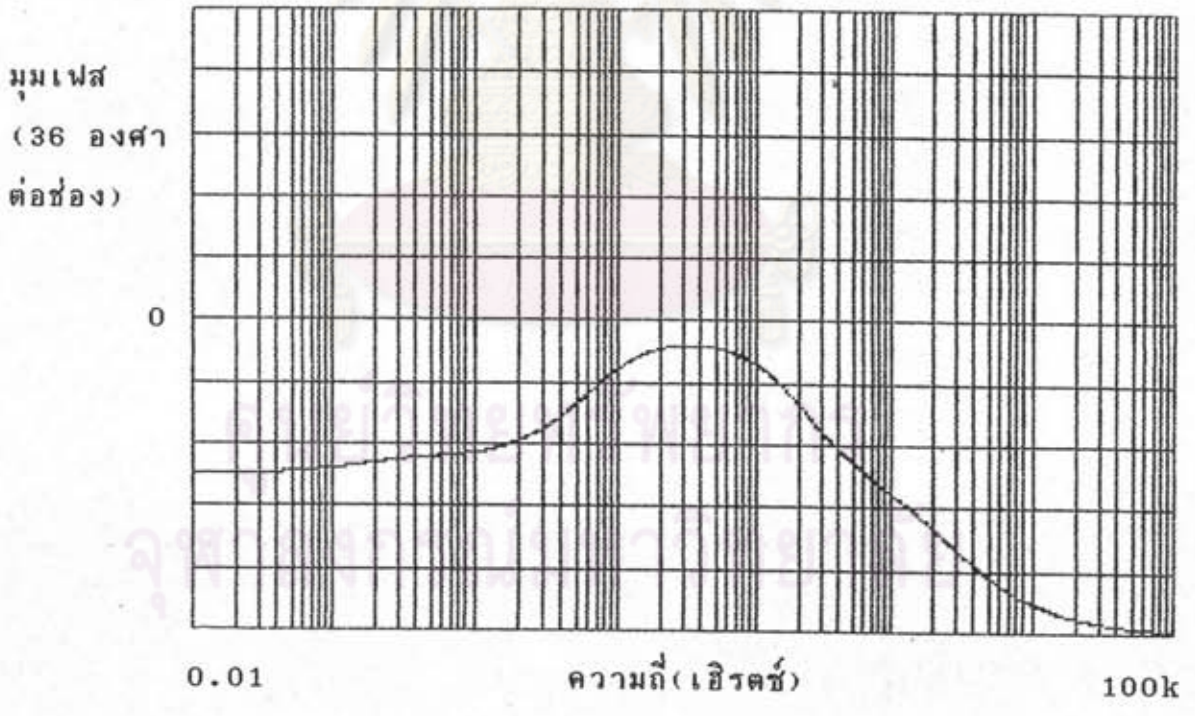
เทอมสุดท้ายซึ่งเป็นฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรคุมค่าแรงดันออกจะต้องทำการเลือกชนิดของวงจรคุมค่าและตำแหน่งของขั้ว(poles)และ ศูนย์ (zero)ให้เหมาะสม เพื่อให้วงจรมีการตอบสนองที่ดีจากการพิจารณารูปที่ 3.11 เพื่อให้อัตราขยายที่ความถี่สูงลดลงต่ำกว่า 0 เดซิเบล โดยอัตราขยายความถี่ต่ำมีค่าสูงซึ่งจะทำให้มีค่าVoltageregulation ที่ดี จึงเลือกใช้วงจรคุมค่าแรงดันออกที่มีลักษณะ integralและมีศูนย์ 1 ศูนย์ ที่ความถี่ 0.34 เฮิรตซ์ (เพื่อชดเชยขั้วที่ความถี่ประมาณ 0.34 เฮิรตซ์) และเนื่องจาก ($\hat{v}_o/\hat{v}_c$) มีศูนย์คู่ที่ความถี่ประมาณ 10 เฮิรตซ์และขั้วคู่ที่ความถี่ประมาณ 200 เฮิรตซ์ ทำให้มีลักษณะการตอบสนองเชิงความถี่ที่มี overshoot มาก เพื่อที่จะทำให้การตอบสนองในช่วงความถี่นี้มี overshoot น้อยลง จึงต้องชดเชยด้วยศูนย์ 1 ศูนย์ ที่ความถี่ประมาณ 200 เฮิรตซ์และขั้ว 1 ขั้ว ที่ความถี่ประมาณ 10 เฮิรตซ์และนอกจากนี้เพื่อให้ T_v มี crossover freqeuncy มากกว่า 500 เฮิรตซ์ จึงให้วงจรคุมค่าแรงดันออกอัตราขยายที่ความถี่สูงเท่ากับ 32 เดซิเบล ดังนั้นอัตราขยายของวงจรคุมค่าแรงดันออกที่เลือกจึงมีฟังก์ชันโอนย้ายเป็นไปตามสมการ 3.12

$$gv = 48 \times \frac{sx0.47 + 1}{sx0.47} \times \frac{sx0.0008 + 1}{sx0.017 + 1} \qquad (3.12)$$

จากนั้นก็ทำการคำนวณผลตอบทางความถี่ของอัตราขยายวงรอบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Mathcad ได้ผลการคำนวณผลตอบทางความถี่ของอัตราขยายวงรอบ (T_v) ดังรูปที่ 3.14 จากรูปที่ 3.14 จะเห็นได้ว่าระบบจะมี gain margin มากกว่า 60 เดซิเบลและ phase margin มากกว่า 60 องศา ซึ่งมีค่ามากเพียงพอที่จะทำให้ระบบทำงานอย่างมีเสถียรภาพ ในการคำนวณหาแถบความถี่ของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงเมื่อทำงานในภาคแรงดัน จะหาได้จากฟังก์ชันโอนย้ายของแรงดันออกต่อแรงดันตั้งค่าตามสมการ 3.13 เมื่อทำการคำนวณอัตราขยายวงรอบปิดโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Mathcad ได้ผลตอบทางความถี่ดังรูปที่ 3.15

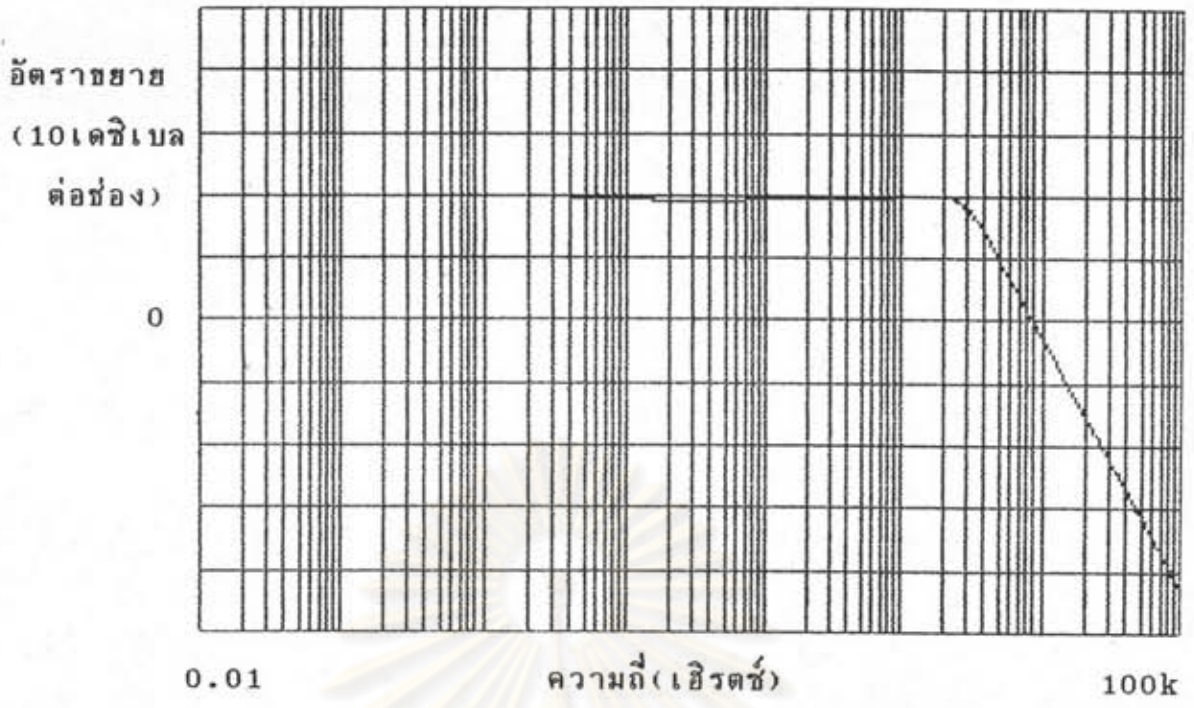


ก.อัตราขยาย

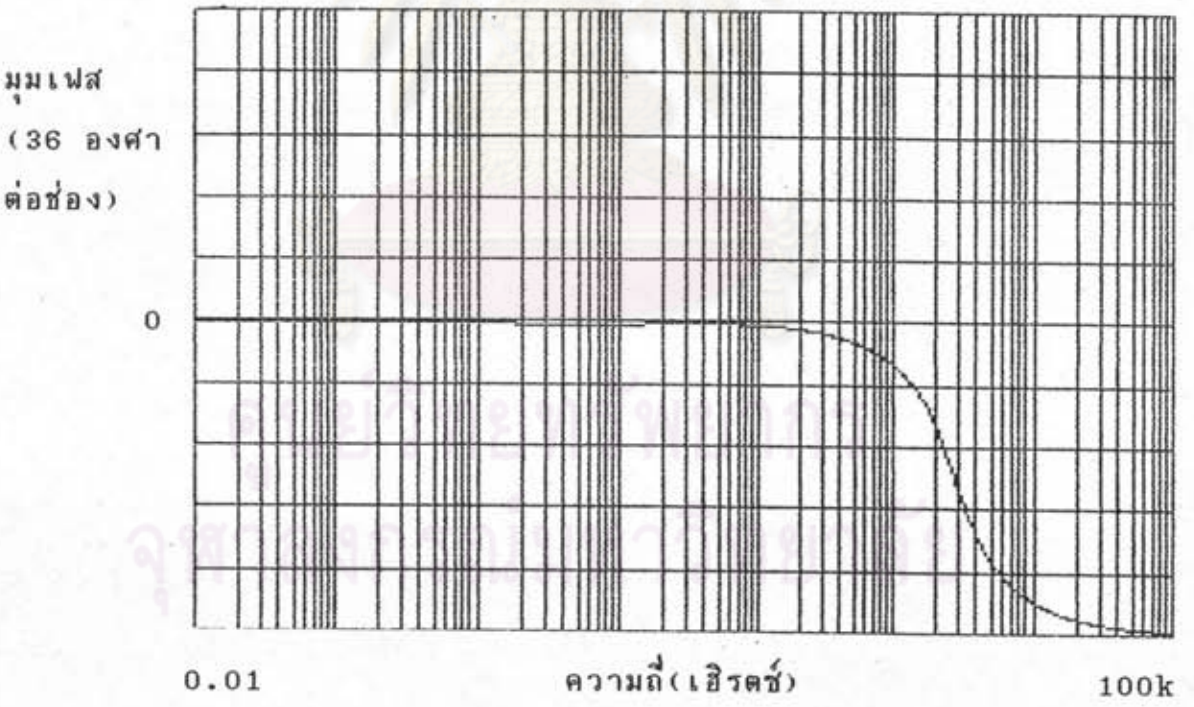


ข.มุมเฟส

รูปที่ 3.14 แสดงอัตราขยายวงรอบแรงดัน (T_v)
เมื่อ gv เป็นตามสมการที่ 3.12



ก.อัตราขยาย



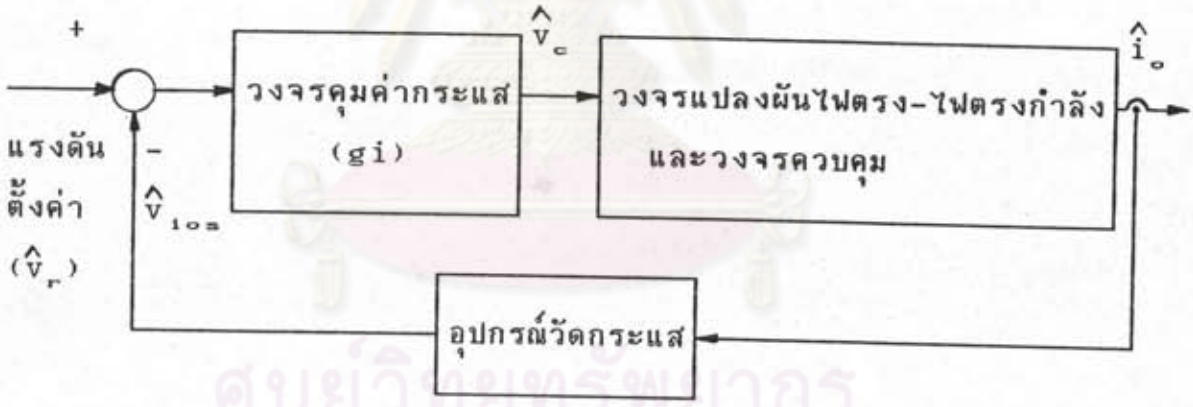
ข.มุมเฟส

รูปที่ 3.15 แสดงอัตราขยายวงรอบปิดแรงดัน
เมื่อมี gv เป็นไปตามสมการที่ 3.12

$$\frac{\hat{v}_o}{\hat{v}_r} = \frac{\frac{\hat{v}_o}{v_c} \cdot gv}{1 + \frac{\hat{v}_o}{\hat{v}_c} \cdot \frac{\hat{v}_{os}}{\hat{v}_o} \cdot gv} \qquad (3.13)$$

จากรูปที่ 3.15 จะเห็นได้ว่าระบบมีแถบความถี่ประมาณเท่ากับ 3 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งมากกว่า 500 เฮิรตซ์ ตามที่กำหนดไว้

การออกแบบวงจรคุมค่ากระแสออกก็มีวิธีการออกแบบคล้ายกับการออกแบบวงจรคุมค่าแรงดันออก โดยจากรูปที่ 3.2 สามารถเขียนบล็อกไดอะแกรมการควบคุมสำหรับสัญญาณขนาดเล็กของวงจรขยายเชอร์โวกระแสตรงเมื่อทำงานในภาคกระแสได้ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 แสดงบล็อกไดอะแกรมการควบคุมสำหรับสัญญาณขนาดเล็กของวงจรขยายเชอร์โวกระแสตรงเมื่อทำงานในภาคกระแส

ระบบที่แสดงอยู่ในรูปที่ 3.16 มีอัตราขยายวงรอบ (T_i) เป็นไปตามสมการ 3.14

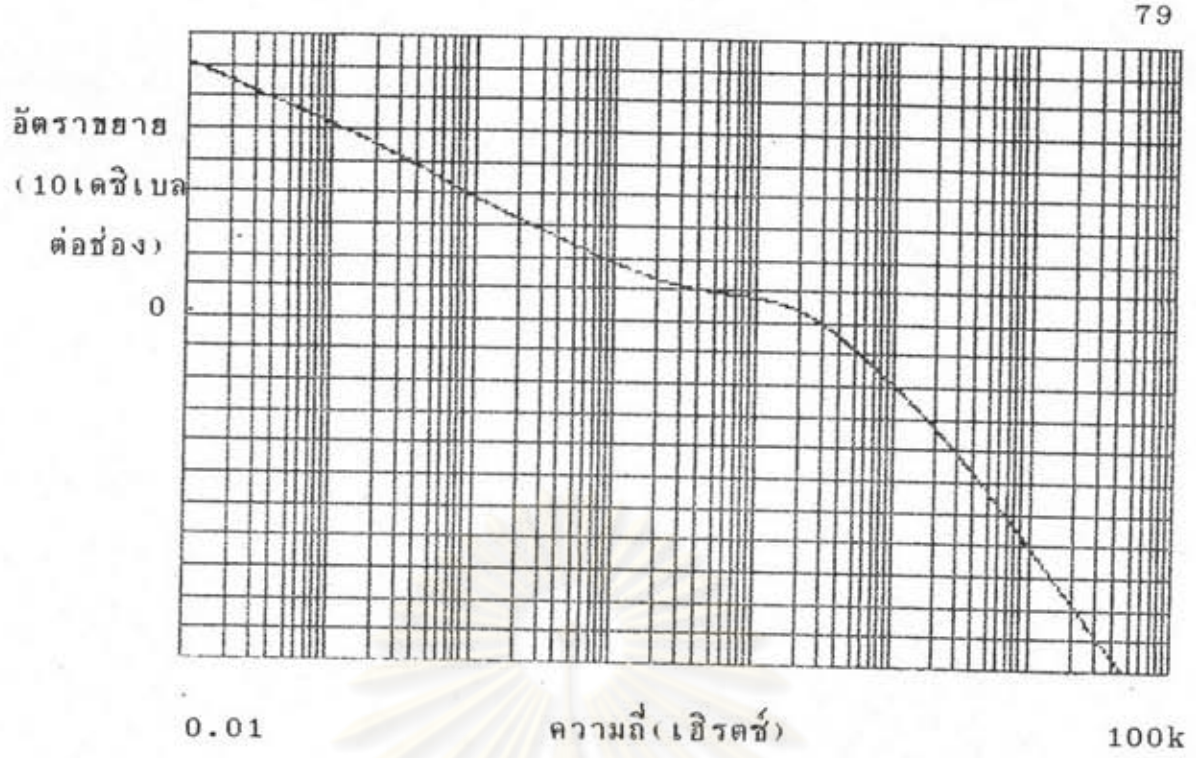
$$T_1 = \frac{\hat{i}_o}{\hat{v}_c} \cdot \frac{\hat{v}_{ios}}{\hat{i}_o} \cdot gi \qquad (3.14)$$

เมื่อ gi คืออัตราขยายของวงจรคุมค่ากระแสออก

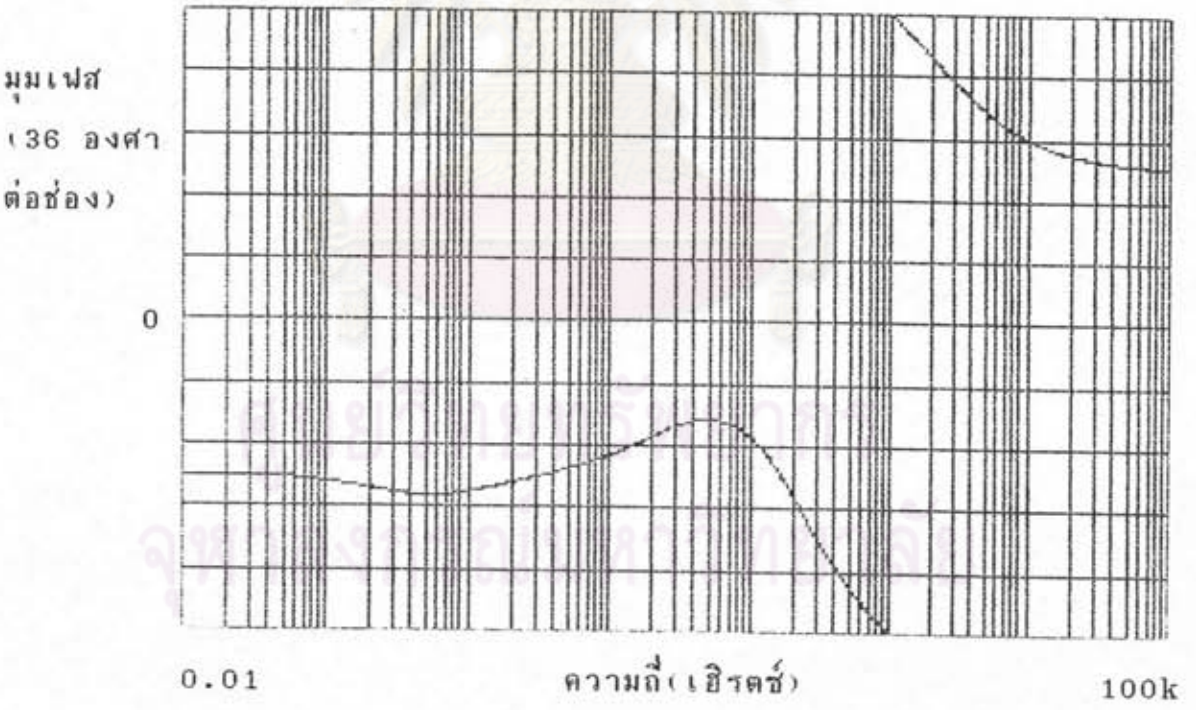
ส่วนเทอม $\hat{i}_o/\hat{v}_c$ จะเป็นไปตามสมการ 2.58 โดยมีผลตอบทางความถี่แสดงดังในรูปที่ 3.12 ซึ่งเป็นกรณีที่มีแถบความถี่แคบที่สุด เทอม $\hat{v}_{ios}/\hat{i}_o$ ก็คือ อัตราขยายการตรวจจับกระแสออก เมื่อใช้สัญญาณคำสั่งกระแสมีค่าสูงสุดเท่ากับ 10 โวลต์เพื่อควบคุมให้กระแสออกเท่ากับ 20 แอมแปร์ ดังนั้นอัตราขยายของวงจรป้อนกลับกระแสควรมีค่าเท่ากับ 0.5 โวลต์ ต่อ แอมแปร์ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.12 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการชดเชยศูนย์ 1 ศูนย์ ที่ความถี่ประมาณ 0.04 เฮิรตซ์, ขั้ว 1 ขั้ว ที่ความถี่ประมาณ 0.7 เฮิรตซ์, ขั้ว 1 ขั้ว ที่ความถี่ประมาณ 30 เฮิรตซ์และทำให้อัตราขยายไฟตรงมีค่าสูง อัตราขยายของวงจรคุมค่ากระแสออก(gi) ที่เหมาะสม ควรเป็นไปตามสมการ 3.15

$$gi = 30.5 \times \frac{0.0053xs + 1}{0.0053xs} \times \frac{0.22xs + 1}{3.9xs + 1} \qquad (3.15)$$

จากนั้นก็ทำการคำนวณผลตอบทางความถี่ของอัตราขยายวงรอบ (T_1) โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Mathcad ได้ผลการคำนวณผลตอบทางความถี่ของอัตราขยายวงรอบ(T_1) ดังรูปที่ 3.17 จากรูปที่ 3.17 จะเห็นได้ว่าระบบมี gain margin เท่ากับ 20 เดซิเบล และ phase margin เท่ากับ 54 องศา ซึ่งมีค่ามากเพียงพอที่จะทำให้ระบบทำงานอย่างมีเสถียรภาพ การคำนวณหาแถบความถี่ของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงเมื่อทำงานในภาคกระแส จะหาได้จากฟังก์ชันโอนย้ายของกระแสออกต่อแรงดันตั้งค่าตามสมการ3.16 เมื่อทำการคำนวณอัตราขยายวงรอบปิดโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Mathcad ได้ผลตอบทางความถี่ดังรูปที่ 3.18

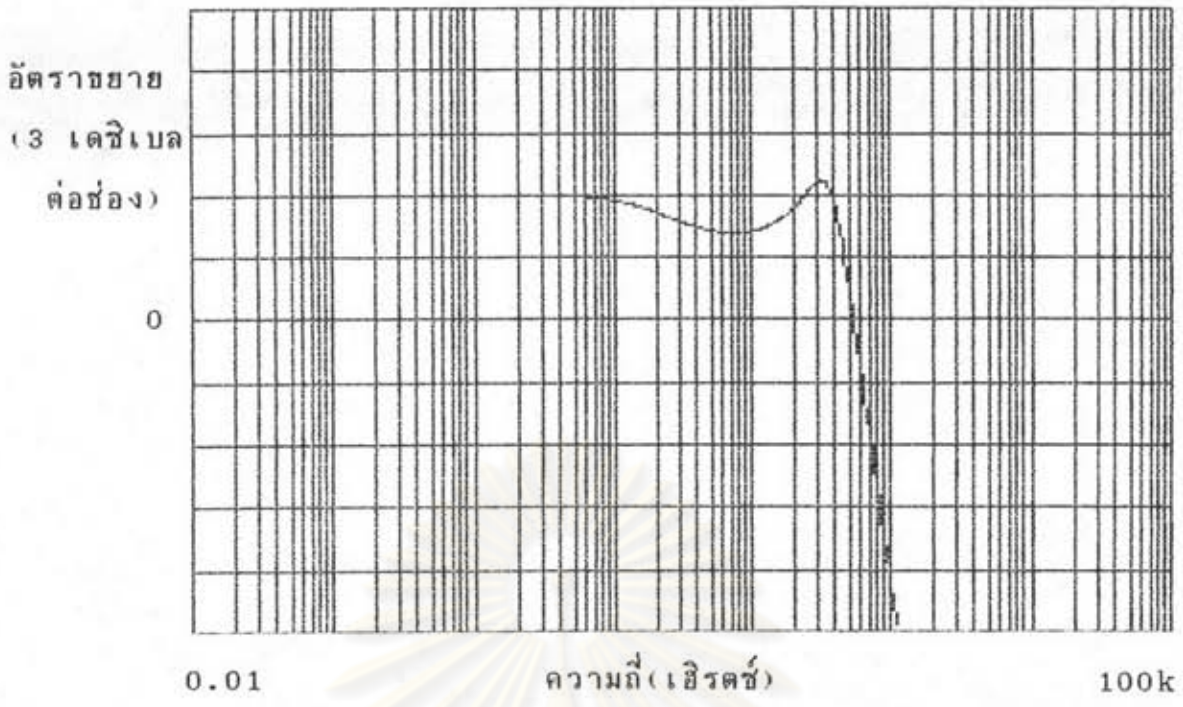


ก.อัตราขยาย

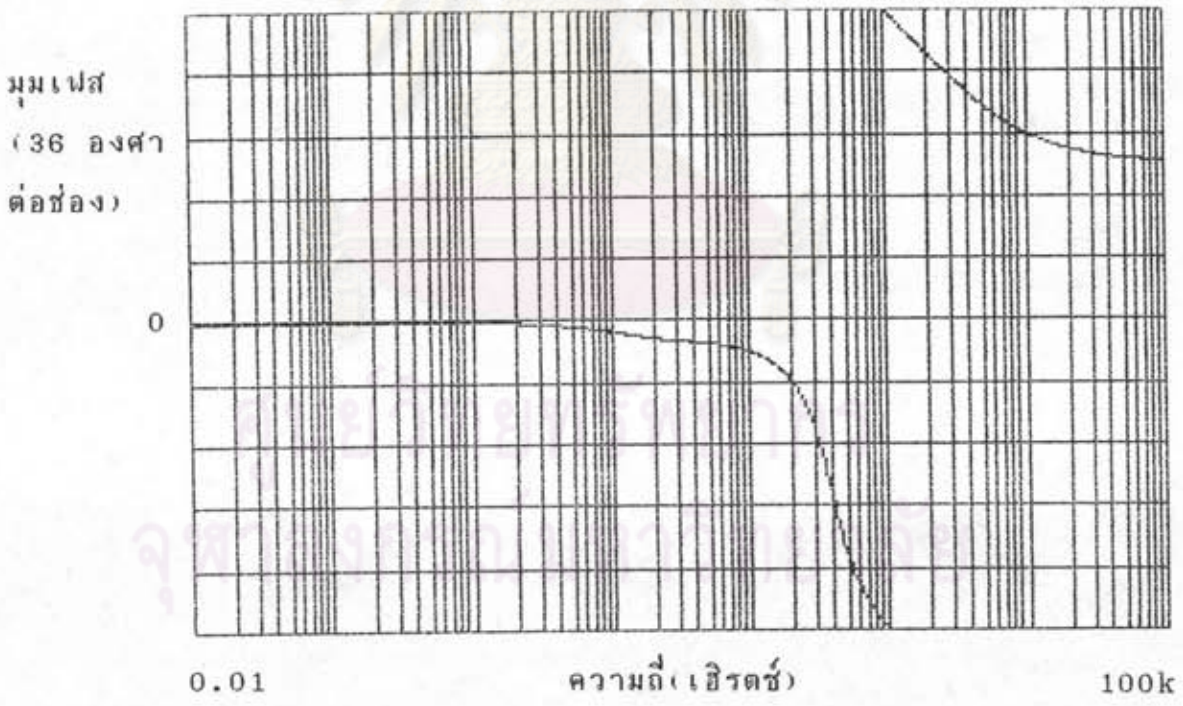


ข.มุมเฟส

รูปที่ 3.17 แสดงอัตราขยายวงรอบกระแส (T_i)
เมื่อ gi เป็นตามสมการที่ 3.15



ก. อัตราขยาย



ข. มุมเฟส

รูปที่ 3.18 แสดงอัตราขยายวงรอบปิดกระแส
เมื่อ gi เป็นไปตามสมการที่ 3.15

$$\frac{\hat{i}_o}{\hat{v}_r} = \frac{\frac{\hat{i}_o}{\hat{v}_c} \cdot gi}{1 + \frac{\hat{i}_o}{\hat{v}_c} \cdot \frac{\hat{v}_{ios}}{\hat{i}_o} \cdot gi} \qquad (3.16)$$

จากรูปที่ 3.18 จะเห็นได้ว่าระบบมีแถบความถี่ประมาณเท่ากับ 450 เฮิรตซ์

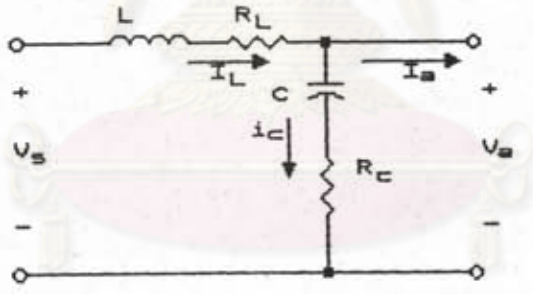
3.4 การจำลองการทำงานของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรง

ในการออกแบบวงจรคุมค่า (regulator) ในหัวข้อ 3.3 นั้นได้ใช้วงจรสมมูลแบบเชิงเส้นสำหรับสัญญาณขนาดเล็กรอบๆจุดทำงานสงบค่าต่างๆกัน เป็นแนวทางในการเลือกฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรคุมค่าทั้งในกรณีของวงจรคุมค่าแรงดันและวงจรคุมค่ากระแส เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพตลอดช่วงของกระแสออกและแรงดันออกของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรง อย่างไรก็ดีวงจรสมมูลดังกล่าวจะมีความถูกต้องสำหรับสัญญาณหรือการเปลี่ยนแปลงที่มีขนาดเล็กเท่านั้น เพื่อให้ทราบถึงเสถียรภาพตลอดจนพฤติกรรมของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงสำหรับสัญญาณหรือการเปลี่ยนแปลงที่มีขนาดใหญ่ จำเป็นต้องวิเคราะห์การทำงานของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถเลียนแบบการทำงานของวงจรไม่เชิงเส้นและมีสัญญาณขนาดใหญ่ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เลือกใช้คือโปรแกรม TUTSIM Version 1.4 ซึ่งสามารถรับข้อมูลที่เป็นฟังก์ชันโอนย้ายแบบเชิงเส้นทั้งอันดับที่หนึ่งและอันดับที่สอง, วงจรบวกลบคูณหาร, วงจรตรรกและฟังก์ชันแบบไม่เชิงเส้นได้ ดังนั้น จึงสามารถใส่ฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรคุมค่า (regulator), วงจรตรรก ตลอดจนการทำงานของสวิตช์ของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงเข้าไปได้โดยตรง ส่วนวงจรกรอง, มอเตอร์กระแสตรง, เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงและภาระทางไฟฟ้าจะต้องเขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันโอนย้ายแบบเชิงเส้นหรือบล็อกไดอะแกรมเสียก่อนจึงจะสามารถ

ป้อนเป็นข้อมูลให้กับคอมพิวเตอร์ได้ การจำลองการทำงานจะทำการจำลองวงจรที่มีบล็อกไดอะแกรมดังในรูปที่ 3.1, 3.2 โดยข้อมูลที่ป้อนแก่โปรแกรม TUTSIM มีบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 3.22, 3.23 เมื่อให้วงจรทำงานในภาคแรงดันและภาคกระแส ตามลำดับ การเตรียมข้อมูลของส่วนประกอบที่สำคัญของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงสำหรับป้อนให้กับคอมพิวเตอร์จะทำได้ดังนี้

3.4.1 <u>วงจรคุมค่า</u> จะแทนวงจรคุมค่าด้วยฟังก์ชันโอนย้ายแบบเชิงเส้นของวงจรคุมค่าตามที่ได้ออกแบบไว้โดยวงจรคุมค่าแรงดันและวงจรคุมค่ากระแสจะแทนด้วยฟังก์ชันโอนย้ายแบบเชิงเส้นตามสมการ3.12 และ3.15 ตามลำดับ

3.4.2 <u>วงจรกรอง LC แบบผ่านต่ำ</u> สามารถหาฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรกรองแบบ LC ได้โดยง่าย อย่างไรก็ดีเนื่องจากไม่สามารถแทนมอเตอร์และโหลดของมอเตอร์ด้วยวงจรไฟฟ้าแบบง่ายได้ ดังนั้นจะเชื่อมโยงวงจร LC กับมอเตอร์ผ่านทางกระแสอาร์เมเจอร์ (i_a)และแรงดันอาร์เมเจอร์ (v_a)ของมอเตอร์ตามวงจรในรูปที่ 3.19 และสมการต่อไปนี้คือ



รูปที่ 3.19 วงจรกรอง LC แบบผ่านต่ำ

$$i_L = (v_a - v_a) \cdot \frac{1}{s.L + R_L} \qquad (3.17)$$

$$v_a = (i_L - i_a) \cdot \frac{(1 + s.C.R_c)}{s.C} \qquad (3.18)$$

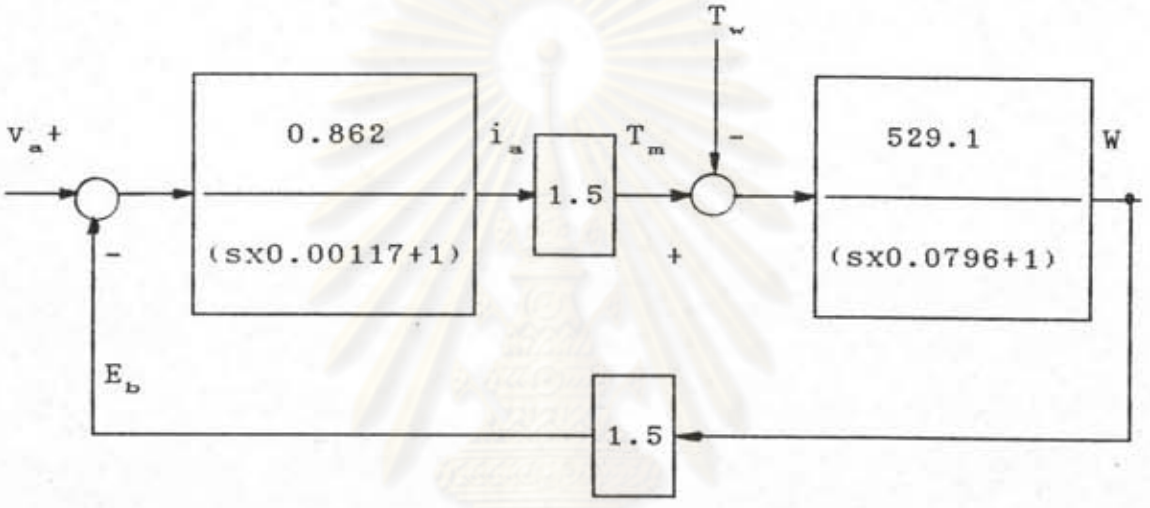
โดยที่ R_L = 0.1 โอห์ม

L = 0.7 มิลลิเฮนรี

C = 54 ไมโครฟารัด

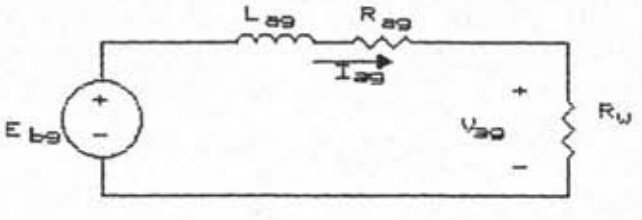
R_c = 0.5 มิลลิโอห์ม

3.4.3 <u>มอเตอร์กระแสตรง</u> จะแทนด้วยบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 2.4 ซึ่งได้นำมาแสดงไว้อีกครั้งหนึ่งในรูปที่ 3.20 โดยได้มีการแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ตามข้อกำหนดและพิกัดของมอเตอร์ที่ใช้



รูปที่ 3.20 บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อแทนค่าตัวค่าคงที่ต่าง ๆ

3.4.4 <u>เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงและหลอดไฟ</u> เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงและหลอดไฟ มีวงจรสมมูลย์ดังในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงและโหลด

จากรูปที่ 3.21 จะได้

$$I_{aa} = (E_{ba} - V_{aa}) \cdot \frac{1}{s.L_{aa} + R_{aa}} \qquad (3.19)$$

$$E_{ba} = K_2.w \qquad (3.20)$$

$$V_{aa} = I_{aa}.R_w \qquad (3.21)$$

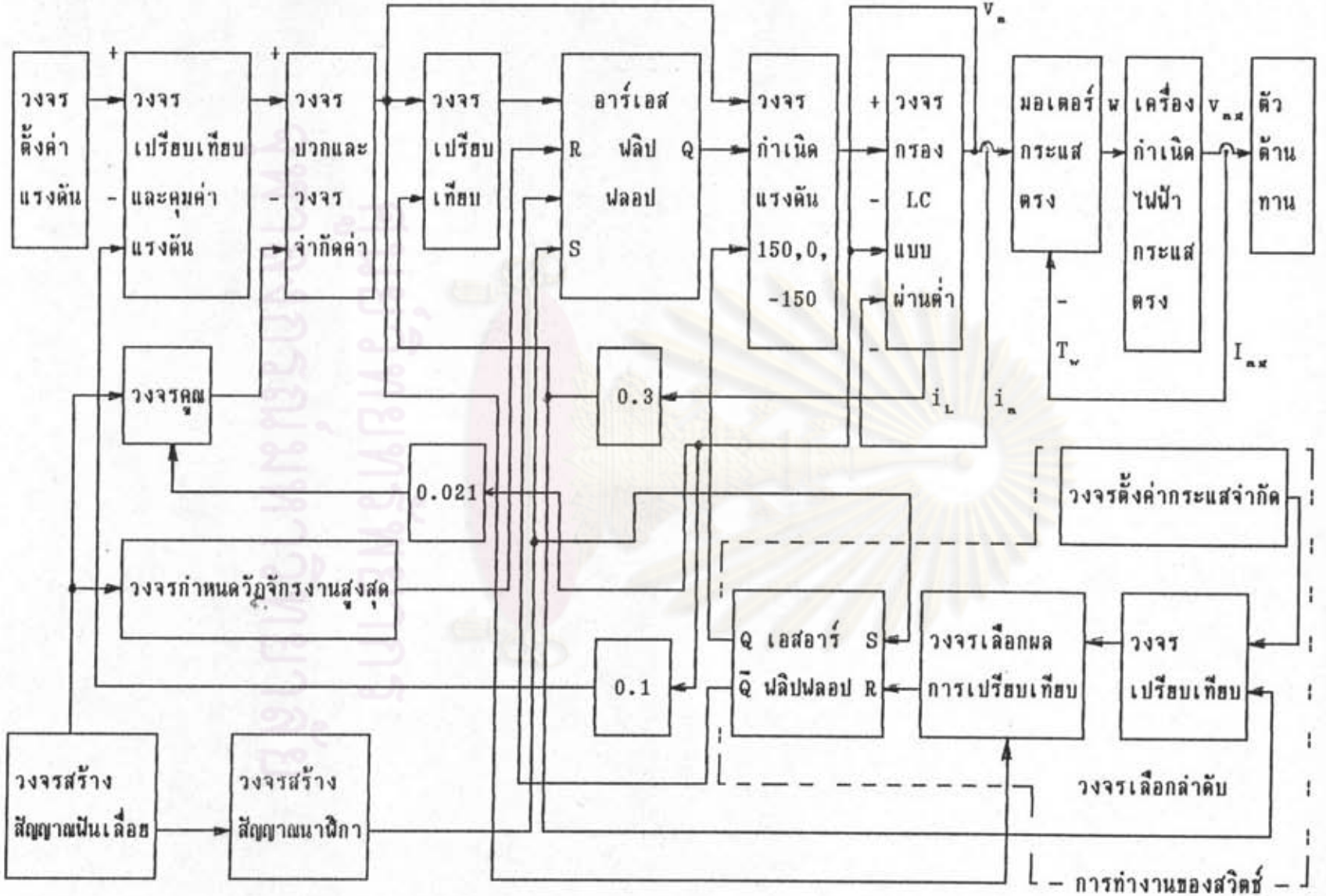
โดยที่ K_2 คือ ค่าคงที่ในการสร้างแรงดันอาร์เมเจอร์ (โวลต์.วินาที/เรเดียน)
หรือ ค่าคงตัวในการสร้างแรงบิด (นิวตัน.เมตร/แอมแปร์)
ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

K_2 = 1.55 โวลต์.วินาที/เรเดียน
L_{aa} = 11 มิลลิเฮนรี่
R_{aa} = 3.2 โอห์ม

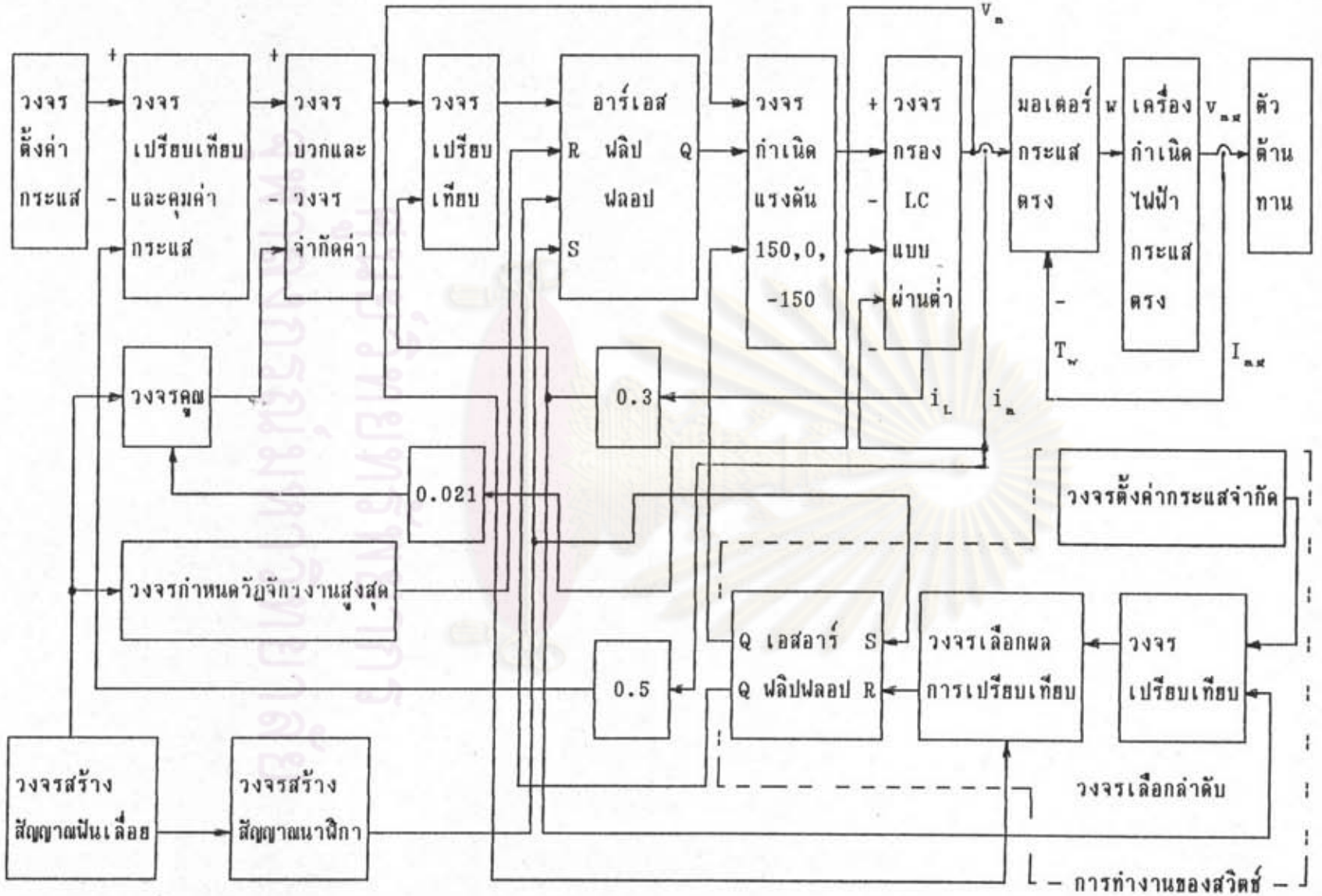
เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงจะเชื่อมโยงกับมอเตอร์กระแสตรงโดยผ่านแรงบิดเชิงกล T_w ซึ่งมีความสัมพันธ์กับกระแสออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงตามสมการ 3.22

$$T_w = K_2.I_{aa} \qquad (3.22)$$

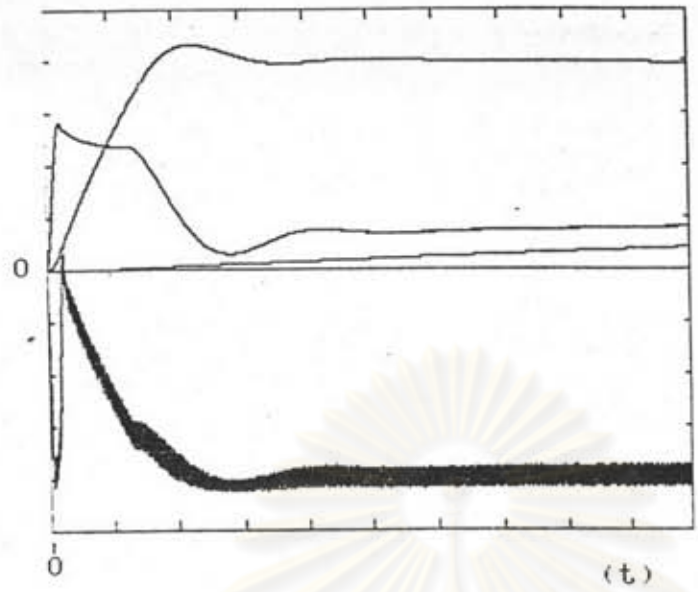
รูปที่ 3.22 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงที่ทำงานในภาคแรงดัน ส่วนรูปที่ 3.23 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงที่ทำงานในภาคกระแส ส่วน List โปรแกรมของวงจรทั้งสองแสดงอยู่ในภาคผนวก ผลการจำลองการทำงานที่สภาวะต่างๆที่ได้จะทำการวิเคราะห์และนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองในบทที่ 5 ต่อไป ผลการจำลองการทำงานของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรที่ทำงานในภาคแรงดันและภาคกระแสในกรณีที่มีการเปลี่ยนสัญญาณอ้างอิงและโหลดแบบขั้นแสดงอยู่ในรูปที่ 3.24 ถึงรูปที่ 3.31



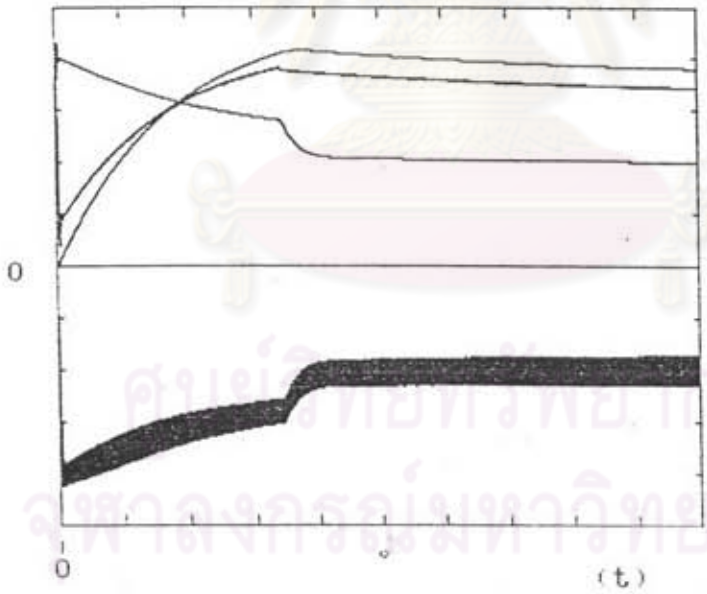
รูปที่ 3.22 บล็อกไดอะแกรมของวงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงเมื่อทำงานในภาคแรงดัน



รูปที่ 3.23 บล็อกไดอะแกรมของวงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงเมื่อทำงานในภาคกระแส

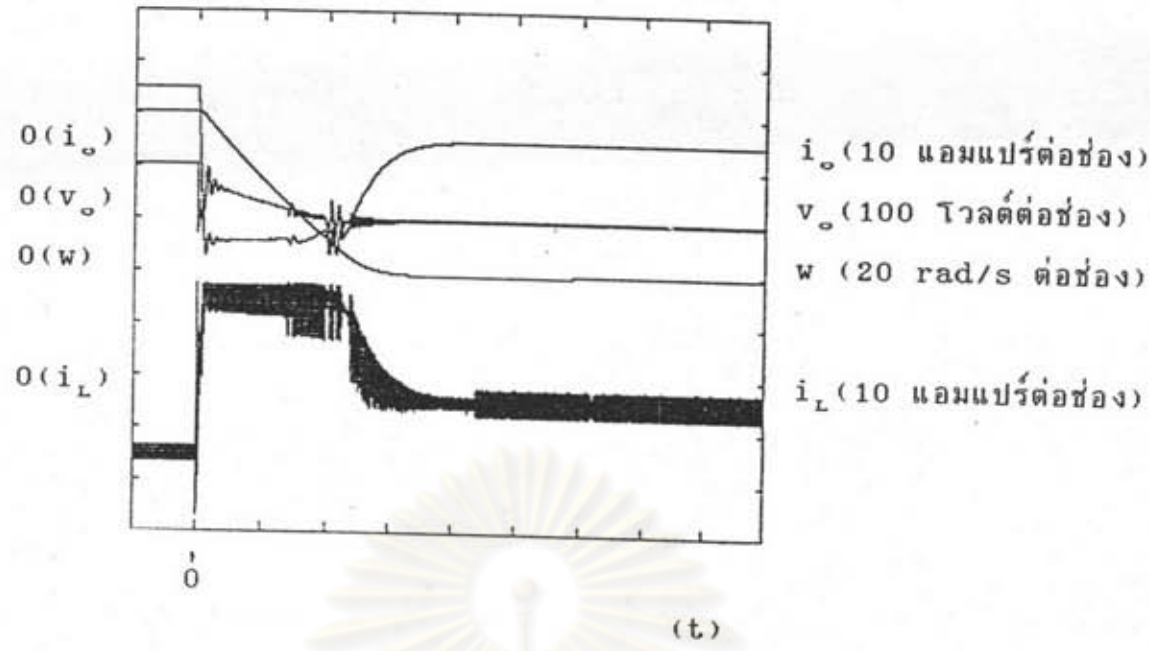


ก.สเกลเวลา 2 มิลลิวินาทีต่อช่อง



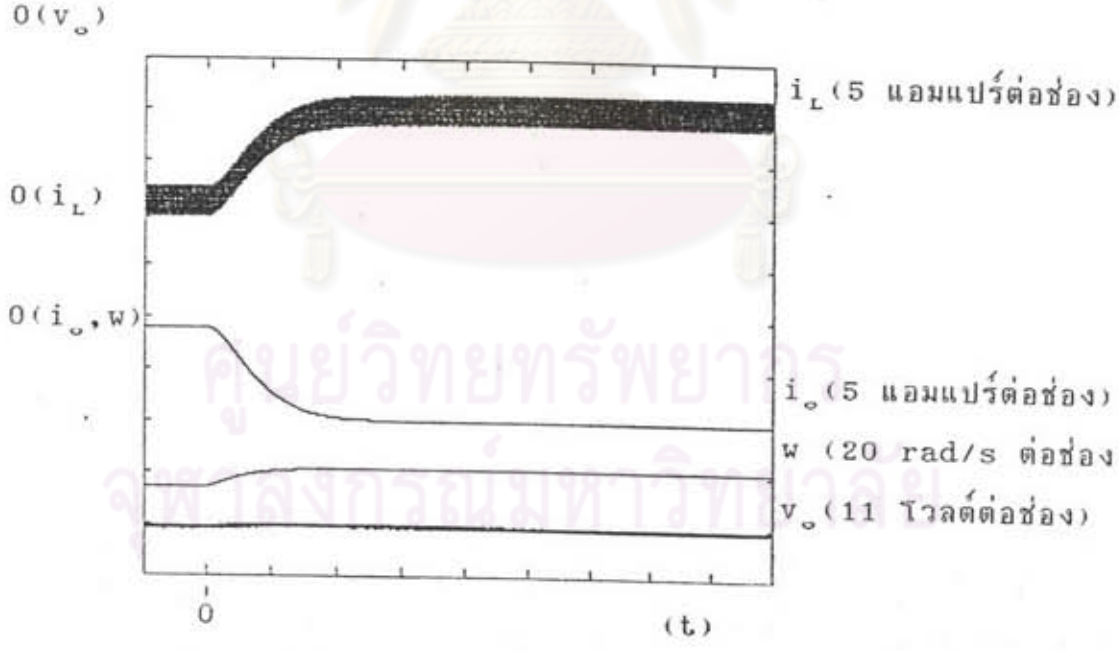
ข.สเกลเวลา 110 มิลลิวินาทีต่อช่อง

รูปที่ 3.24 ผลการจำลองการทำงานของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรง
เมื่อทำงานในภาคแรงดัน และได้รับแรงดันตั้งค่าแบบขั้น
จาก 0 โวลต์ เป็น -10 โวลต์



สเกลเวลา 50 มิลลิวินาทีต่อช่อง

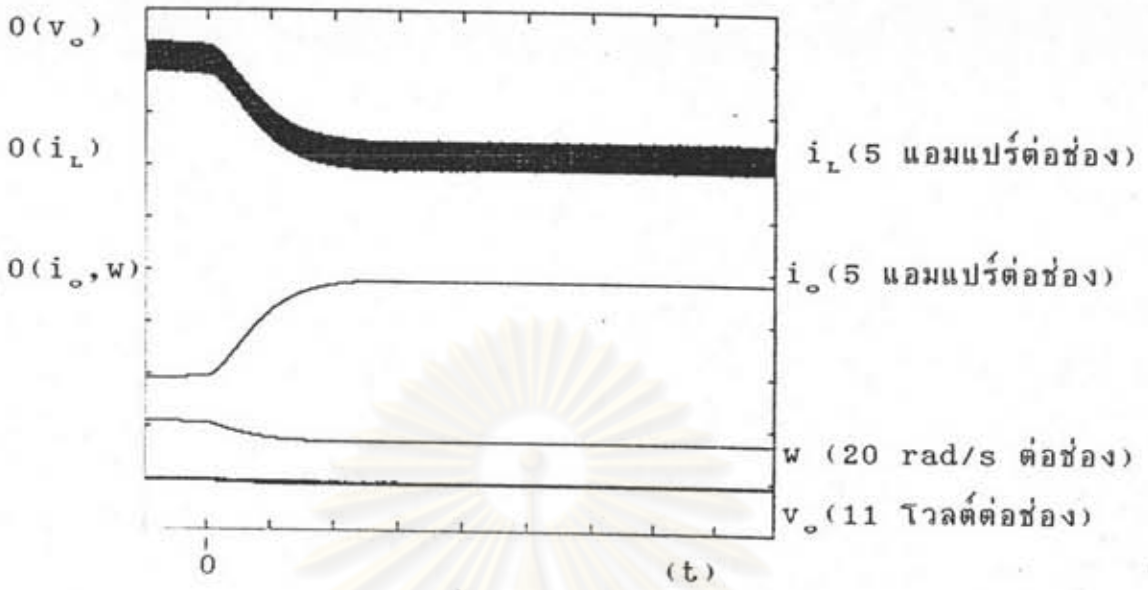
รูปที่ 3.25 ผลการจำลองการทำงานของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรง เมื่อทำงานในภาคแรงดัน และได้รับแรงดันตั้งค่าแบบขั้น จาก -10 โวลต์ เป็น 0 โวลต์



สเกลเวลา 50 มิลลิวินาทีต่อช่อง

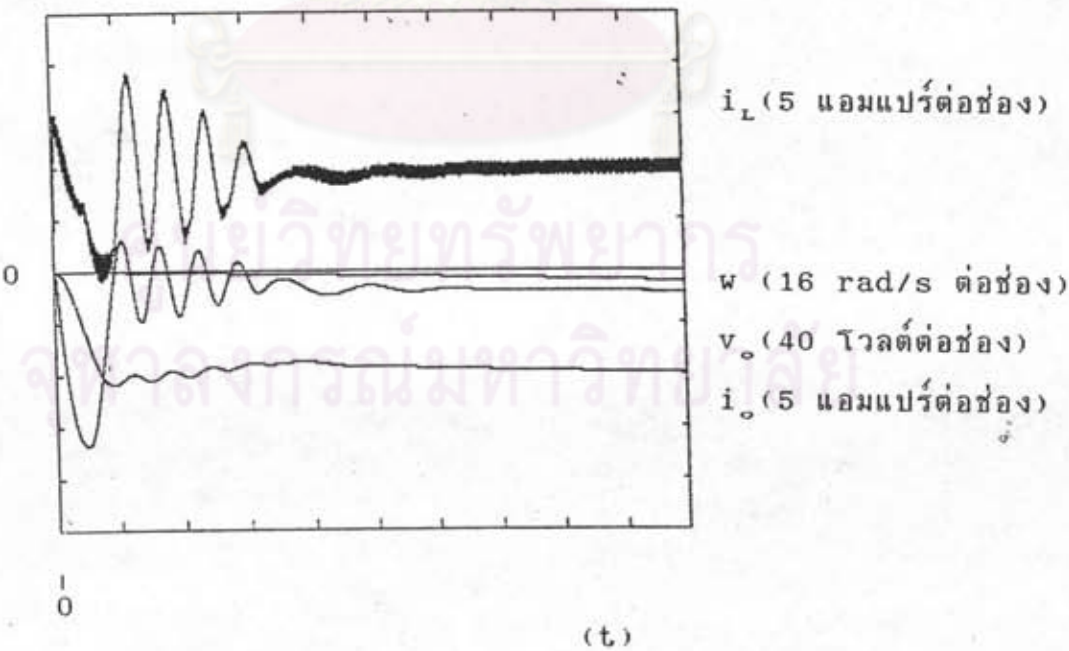
รูปที่ 3.26 ผลการจำลองการทำงานของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรง เมื่อทำงานในภาคแรงดัน และมีการเพิ่มโหลดแบบขั้นจาก -1 แอมแปร์ เป็น -10 แอมแปร์ ที่แรงดันออก -100 โวลต์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

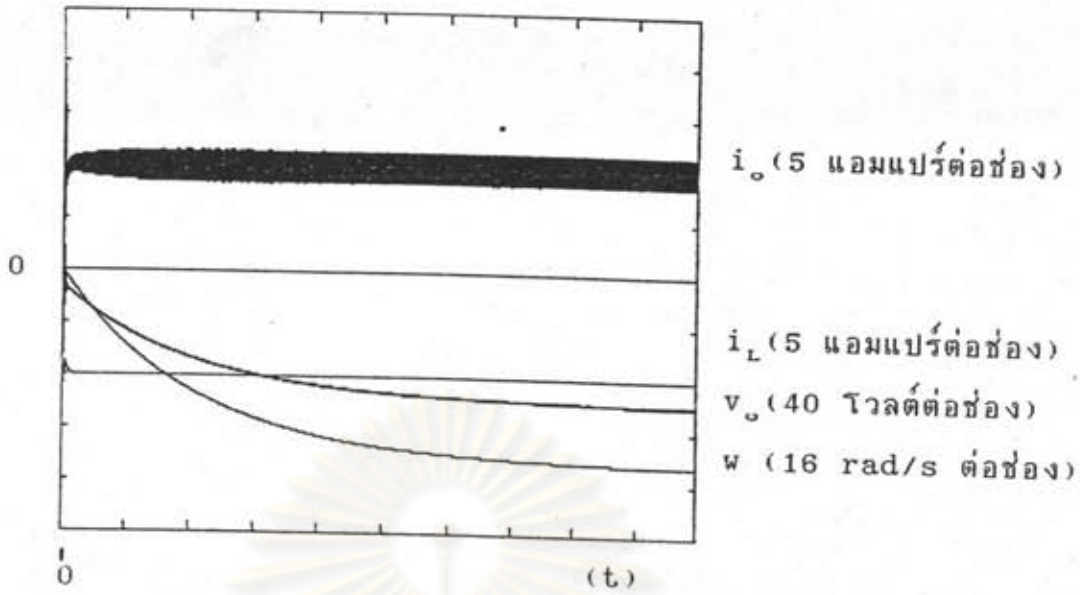


สเกลเวลา 50 มิลลิวินาทีต่อช่อง

รูปที่ 3.27 ผลการจำลองการทำงานของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรง เมื่อทำงานในภาคแรงดัน และมีการลดโหลดแบบขั้นจาก -10 แอมแปร์ เป็น -1 แอมแปร์ ที่แรงดันออก 100 โวลต์

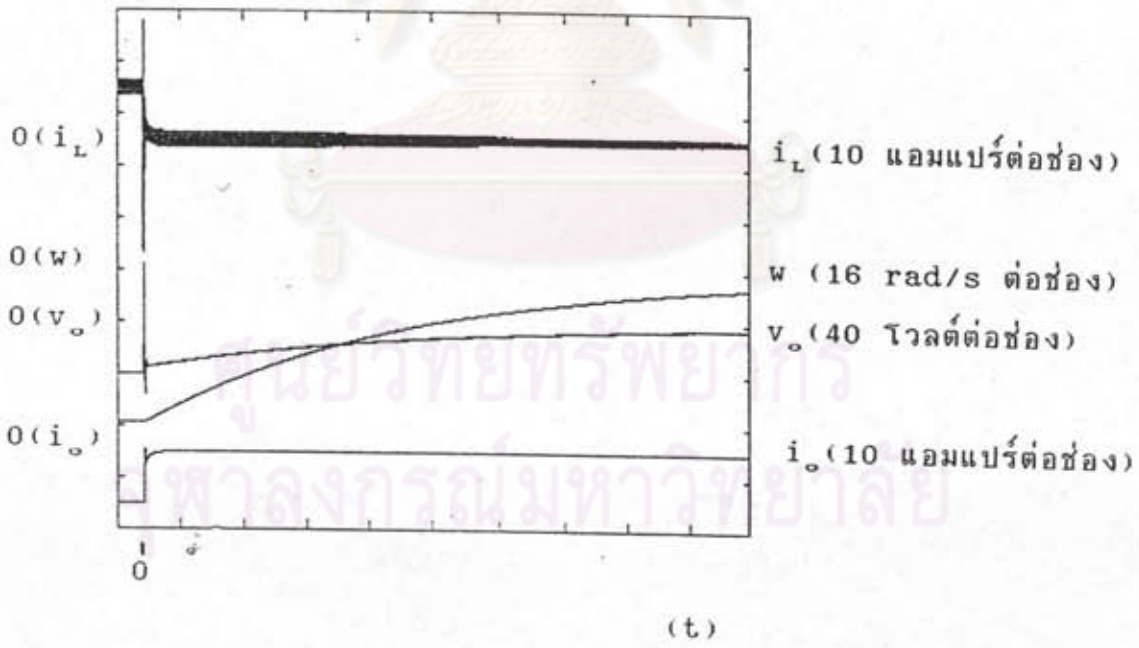


ก. สเกลเวลา 2 มิลลิวินาทีต่อช่อง



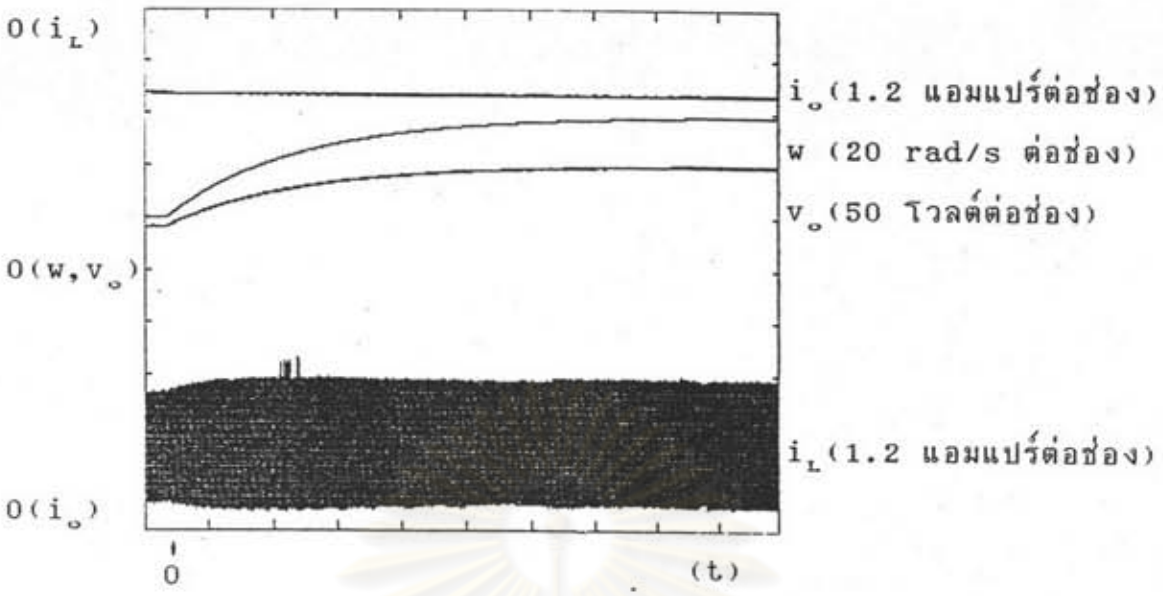
ข.สเกลเวลา 150 มิลลิวินาทีต่อช่อง

รูปที่ 3.28 ผลการจำลองการทำงานของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรง เมื่อทำงานในภาคกระแส และได้รับแรงดันตั้งค่าแบบขั้นจาก 0 โวลต์ เป็น 5 โวลต์



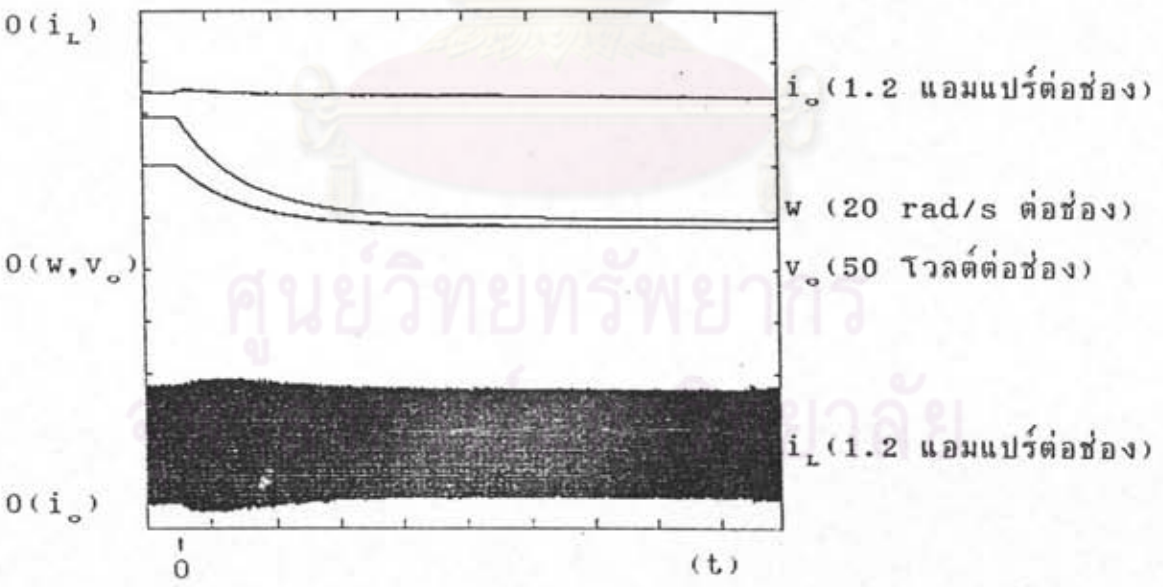
สเกลเวลา 73 มิลลิวินาทีต่อช่อง

รูปที่ 3.29 ผลการจำลองการทำงานของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรง เมื่อทำงานในภาคกระแส และได้รับแรงดันตั้งค่าแบบขั้นจาก 5 โวลต์ เป็น 0 โวลต์



สเกลเวลา 150 มิลลิวินาทีต่อช่อง

รูปที่ 3.30 ผลการจำลองการทำงานของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรง เมื่อทำงานในภาคกระแส และมีการเพิ่มโหลดแบบขั้นจาก 40 โวลต์ เป็น 100 โวลต์ ที่กระแสออก 10 แอมแปร์



สเกลเวลา 100 มิลลิวินาทีต่อช่อง

รูปที่ 3.31 ผลการจำลองการทำงานของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรง เมื่อทำงานในภาคกระแส และมีการลดโหลดแบบขั้นจาก 100 โวลต์ เป็น 40 โวลต์ ที่กระแสออก 10 แอมแปร์