

บทที่ 4

วงจรขยายสัญญาณ

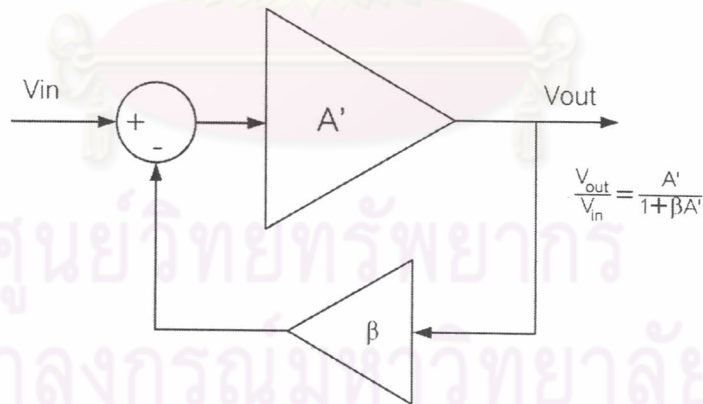
4.1 หลักการทำงาน

วงจรขยายสัญญาณที่ออกแบบแบ่งเป็นสองวงจร คือ

1. วงจรขยายแรงดัน ซึ่งทำหน้าที่ขยายสัญญาณแรงดันต้นแบบให้มีขนาดใหญ่สำหรับช่องสัญญาณแรงดัน
2. วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส ทำหน้าที่แปลงสัญญาณแรงดันต้นแบบให้เป็นกระแสและขยายสัญญาณให้มีขนาดใหญ่

ลักษณะสมบัติของวงจรทั้งสองที่ต้องการ คือ ไม่ทำให้เกิดความเพี้ยนที่สัญญาณด้านออก วงจรมีเสถียรภาพ และมีการคุมค่าสัญญาณออกที่ดี (สัญญาณออกไม่เปลี่ยนแปลงตามโหลดของวงจร) โดยวงจรขยายแรงดันถูกออกแบบให้มีอัตราขยายประมาณ 80 เท่า และวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสถูกออกแบบให้มีอัตราขยายประมาณ $15 A_{rms}/V_{rms}$

โครงสร้างหลักของวงจรขยายสัญญาณที่ใช้ก็คือ การใช้การป้อนกลับเพื่อควบคุมสัญญาณออกให้มีสมบัติใกล้เคียงกับสัญญาณเข้า ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โครงสร้างพื้นฐานของวงจรขยายสัญญาณ

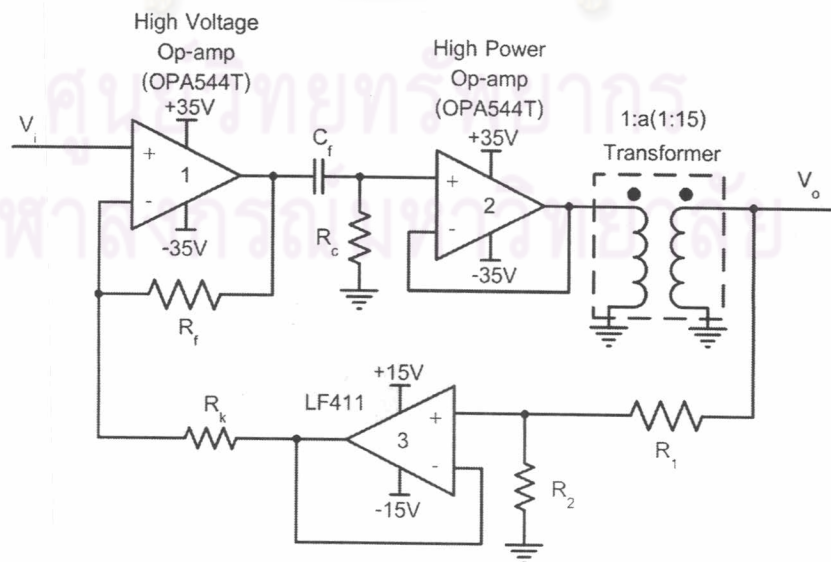
จากรูป วงจรจะประกอบด้วย 2 ส่วนคือ วิถีไปหน้า (Forward path) และวิถีป้อนกลับ (Feedback path) ซึ่งเราสามารถควบคุมอัตราขยายและสมบัติอื่น ๆ ของวงจรที่ออกแบบได้โดยการปรับค่าอัตราขยายของวิถีไปหน้า (Forward path gain) หรือค่า A' ในรูป และอัตราขยายของวิถีป้อนกลับ (Feedback path gain) หรือค่า β ในรูปให้เหมาะสม สำหรับวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส สัญญาณออกของวงจรจะเป็นกระแสออก (I_{out}) โดยจะแทรกส่วนแปลงสัญญาณแรงดัน

เป็นกระแสไว้ภายในวงจร ส่วนประกอบหลักที่ใช้ในการออกแบบวงจรขยายสัญญาณในวิทยานิพนธ์นี้คือ ออปแอมป์ (Operational amplifier ; OP-AMP) และ หม้อแปลงกำลัง (Power transformer) เพื่อให้การควบคุมสัญญาณเป็นไปได้โดยง่ายและได้สัญญาณออกที่มีขนาดใหญ่ตามต้องการ

4.2 การออกแบบวงจรขยายแรงดัน

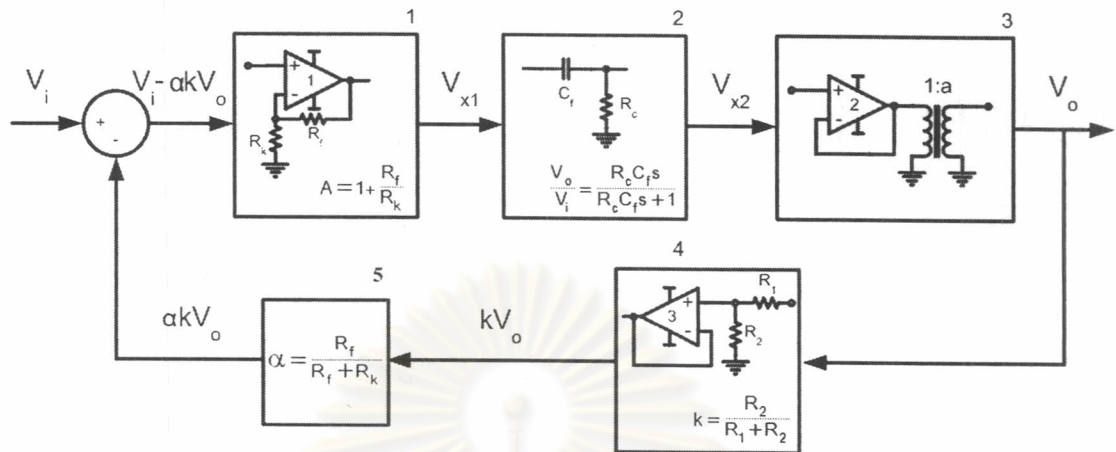
4.2.1 โครงสร้างของวงจรขยายแรงดัน

วงจรขยายแรงดันที่ออกแบบมีโครงสร้างวงจรเป็นดังที่กล่าวไปในหัวข้อที่แล้ว สมบัติของวงจรที่ต้องการคือ วงจรรับแรงดันเข้าเป็นสัญญาณรูปไซน์ที่ความถี่ประมาณ 50 Hz มีค่าน้อยที่สุดเป็น 5 V และขยายเป็นสัญญาณแรงดันออกขนาดประมาณ ± 400 V (อัตราขยายแรงดันประมาณ 80 เท่า) วงจรต้องมีการคงค่าแรงดัน (Voltage regulation) เป็น 0.1 % ความเพี้ยนของสัญญาณออกไม่เกิน 2 % วงจรมีเสถียรภาพที่ดี มีช่วงเวลาเข้าที่ถึงค่า 1 % (1% settling time) เป็น 0.2 s และมีความคลาดเคลื่อนของเฟสของสัญญาณออกเทียบกับสัญญาณเข้าไม่เกิน 0.5 องศา ลักษณะโครงสร้างของวงจรที่ออกแบบเป็นดังรูปที่ 4.2 โดยในวิธีไปหน้าประกอบด้วยออปแอมป์กำลังสูง (High power OP-AMP) จำนวนสองตัว วงจรกันสัญญาณออฟเซต และหม้อแปลงกำลัง ออปแอมป์กำลังสูงทั้งสองตัวที่ใช้เป็นออปแอมป์เบอร์ OPA544T ของบริษัทเท็กซัส อินสตรูเมนต์ (Texas Instruments) ซึ่งสามารถจ่ายแรงดันด้านออกได้สูงสุด ± 31 V ที่ไฟเลี้ยง ± 35 V และจ่ายกระแสด้านออกได้มากที่สุด ± 2 A ส่วนวิธีป้อนกลับจะประกอบด้วยวงจรแบ่งแรงดันและออปแอมป์ ซึ่งเลือกใช้ออปแอมป์เบอร์ LF411 เป็นออปแอมป์กำลังต่ำที่มีจุดเด่นคือ มีค่าออฟเซตของวงจรต่ำ และมีการขยับเลื่อนของแรงดันออฟเซต (Low input offset voltage) ต่ำ ออปแอมป์



รูปที่ 4.2 โครงสร้างของวงจรขยายแรงดัน

ตัวนี้สามารถจ่ายแรงดันขาออกได้ถึง ± 13.5 V ที่ไฟเลี้ยง ± 15 V และสามารถจ่ายกระแสได้ประมาณ ± 10 mA เราสามารถมองวงจรที่ออกแบบแยกเป็นส่วนต่าง ๆ ได้ดังนี้

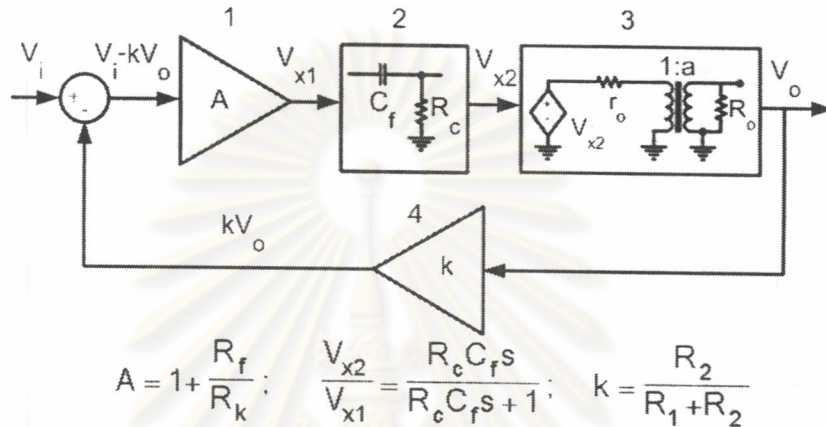


รูปที่ 4.3 แผนภาพแสดงโครงสร้างวงจรขยายแรงดันที่ถูกแยกเป็นส่วน ๆ

จากรูป โครงสร้างของวงจรขยายแรงดันสามารถมองแยกได้เป็น 5 ส่วนด้วยกัน วงจรในบล็อกหมายเลข 1 เป็นตัวกำหนดอัตราขยายของวิถีไปหน้าของวงจร (A' ในรูปที่ 4.1) การปรับค่าอัตราขยายทำโดยเลือกค่า R_f และ R_k ที่เหมาะสม วงจรนี้ทำหน้าที่หลักคือขยายขนาดสัญญาณผลต่างระหว่างสัญญาณเข้าและสัญญาณป้อนกลับ แต่ไม่จำเป็นต้องจ่ายกำลัง ดังนั้นเราจึงสามารถเลือกใช้ออปแอมป์ที่มีช่วงการแกว่งของสัญญาณออก (Output swing) มีค่าสูงแต่ไม่จำเป็นต้องจ่ายกระแสได้สูง สำหรับในวงจรนี้เลือกใช้ออปแอมป์กำลังสูงตัวเดียวกับของวงจรขับหม้อแปลง และเนื่องจากอัตราขยายของวงจรในบล็อกหมายเลข 1 มีค่าสูง ทำให้ออฟเซตของสัญญาณออกจากวงจรสูงตามไปด้วย ดังนั้นจึงไม่สามารถนำวงจรนี้ไปขับหม้อแปลงกำลังได้โดยตรง เพราะจะทำให้สัญญาณออฟเซตที่เป็นไฟตรงไหลเข้าไปในขดลวดเหนี่ยวนำซึ่งมีความต้านทานต่ำเมื่อมองที่ความถี่ต่ำ ทำให้เกิดความร้อนสูญเสียที่อาจเป็นสาเหตุให้หม้อแปลงเสียหายได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวงจรกันออฟเซตมาคั่นไว้ ซึ่งมีลักษณะเป็นวงจรรองความถี่ผ่านสูงซึ่งประกอบไปด้วย C_f และ R_c ดังแสดงในบล็อกหมายเลข 2 และส่วนสุดท้ายในวิถีไปหน้า (บล็อกที่ 3) เป็นวงจรขับหม้อแปลง ประกอบด้วยวงจรออปแอมป์ที่ต่อแบบป้อนกลับด้วยอัตราขยายเป็นหนึ่ง (Unity gain feedback) เพื่อให้มีค่าออฟเซตออกมาที่สัญญาณออกต่ำสุด และหม้อแปลงกำลังทำหน้าที่ขยายขนาดแรงดันให้มีขนาดใหญ่เพียงพอ ค่า a คืออัตราส่วนจำนวนรอบ (Turn ratio) ของหม้อแปลง และสำหรับในวิถีป้อนกลับ สัญญาณป้อนกลับจะถูกแบ่งแรงดันผ่านวงจรแบ่งแรงดันที่ประกอบไปด้วยตัวต้านทานและส่งผ่านวงจรออปแอมป์ที่ต่อแบบป้อนกลับด้วยอัตราขยายเป็นหนึ่งดังในบล็อกที่ 4 ทั้งนี้ก็เพื่อเป็นตัวกันเพื่อให้การป้อนกลับเป็นการป้อนกลับแรงดันเพียงอย่างเดียว อัตราขยายป้อนกลับของวงจรจะเป็นตัวกำหนดอัตราขยายรวมของวงจรโดยจะมี

ค่าเท่ากับอัตราการแบ่งแรงดันของความต้านทานทั้งสองตัวในวงจรแบ่งแรงดัน (ค่า k ในรูปที่ 4.3) ส่วนในบล็อกที่ 5 จะเป็นสัมประสิทธิ์ที่เป็นผลมาจากลักษณะการต่อวงจรป้อนกลับดังในรูปที่ 4.2 ซึ่งพจน์นี้จะมีค่าใกล้เคียง 1 เมื่อ R_f มีค่ามากกว่า R_k มาก ๆ

จากที่กล่าวมาข้างต้นทำให้สามารถเขียนวงจรในรูปแบบแผนภาพบล็อก (Block diagram) ได้ดังรูปที่ 4.4 โดยประมาณค่าสัมประสิทธิ์ α จากในรูปที่ 4.3 เป็น 1 เนื่องจากอัตราขยายในวิถีไปหน้ามีแนวโน้มที่จะมีค่าสูง และเพื่อลดความซับซ้อนในการวิเคราะห์ในภายหลังด้วย

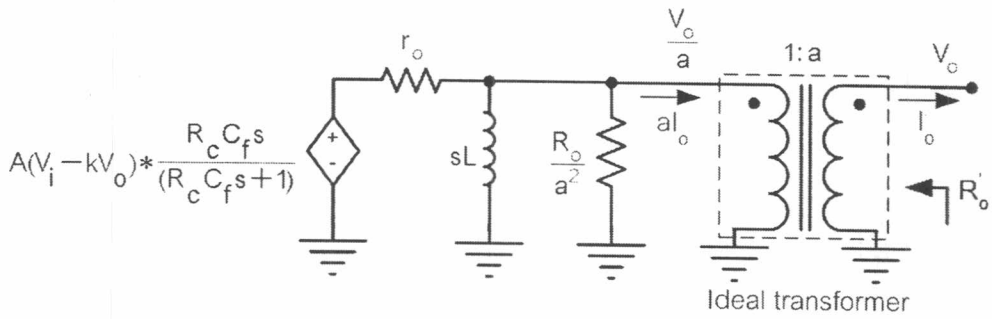


รูปที่ 4.4 แผนภาพบล็อกแสดงของวงจรขยายแรงดัน

จากภาพ เราจะแทนบล็อกหมายเลข 1 และ 4 ด้วยบล็อกของอัตราขยายเพื่อให้ดูง่ายขึ้นโดยประมาณว่าออปแอมป์ที่ใช้ในส่วนนี้เป็นออปแอมป์อุดมคติ ส่วนบล็อกที่ 2 นั้นจะคงไว้อย่างเดิมและในบล็อกหมายเลขสามจะแทนวงจรออปแอมป์ด้วยวงจรสมมูลของออปแอมป์โดยจะมีลักษณะเป็นแหล่งจ่ายแรงดันควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage control voltage source ;VCVS) ที่มีอัตราขยายแรงดันเป็น 1 ร่วมกับความต้านทานขาออกของออปแอมป์ r_o และ R_o คือ ความต้านทานขาออกที่มองจากหม้อแปลงซึ่งมีค่าเท่ากับความต้านทาน R_1 รวมกับ R_2 ขนานกับความต้านทานโหลด จากรูปที่ 4.2 ฟังก์ชันถ่ายโอนของบล็อกที่ 1, 2 และ 4 จะแสดงอยู่ด้านล่างของแผนภาพ สำหรับวงจรในบล็อกที่ 3 เป็นวงจรที่ค่อนข้างซับซ้อนและจะถูกนำมาเป็นวงจรตั้งต้นในการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของทั้งระบบดังนั้นจะขอล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

4.2.2 การวิเคราะห์และเลือกค่าพารามิเตอร์ของวงจร

ลักษณะสมบัติ ของระบบที่สนใจจะวิเคราะห์เพื่อการเลือกค่าพารามิเตอร์ของส่วนประกอบต่าง ๆ ที่จะใช้ในวงจร คือ เสถียรภาพของวงจร ความต่างเฟสของสัญญาณออกของวงจรเทียบกับสัญญาณเข้า และ การคงค่าแรงดันของวงจร เหล่านี้สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้วงจรสมมูลในโดเมนความถี่ของวงจร ซึ่งสามารถเขียนได้จากวงจรสมมูลของวงจรในบล็อกที่ 3 ดังนี้



รูปที่ 4.5 วงจรสมมูลของวงจรขยายแรงดัน

จากรูปวงจรสมมูลในรูปที่ 4.5 ถูกเขียนขึ้นโดยย้ายพารามิเตอร์ทุกตัวในวงจรมายังด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง วงจรด้านออกของออปแอมป์ถูกแทนด้วยแหล่งแรงดันควบคุมด้วยแรงดันและความต้านทานขาออก r_o ค่าแรงดันของแหล่งจ่ายแรงดันควบคุมด้วยแรงดัน คือ แรงดัน V_{x2} ในรูปที่ 4.4 ซึ่งหาได้ดังนี้

$$V_{x2} = \frac{V_{x2}}{V_{x1}} \cdot V_{x1} = \frac{R_c C_f s}{R_c C_f s + 1} \cdot A(V_i - kV_o) \dots \dots \dots \text{สมการที่ 4.1}$$

วงจรสมมูลของหม้อแปลงจะประมาณด้วยความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็ก (Magnetizing inductance) L โดยละเลยพารามิเตอร์อื่น ๆ ไปเพื่อลดความซับซ้อนในการวิเคราะห์ หม้อแปลงที่แสดงในรูปเป็นแบบอุดมคติ (แปลงอัตราส่วนแรงดันและกระแสเท่านั้นโดยไม่มีผลของความเหนี่ยวนำภายใน) ใส่มาเพื่อให้เข้าใจวงจรสมมูลได้ง่ายขึ้น ส่วน $\frac{R_o}{a^2}$ คือ ความต้านทานทางฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลงที่ถูกย้ายไปไว้ที่ฝั่งปฐมภูมิ ค่า a คือ อัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลง V_o คือ สัญญาณแรงดันด้านออกของวงจร และ V_i คือ สัญญาณแรงดันด้านเข้าของวงจร

จากวงจรในรูปที่ 4.5 สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังนี้

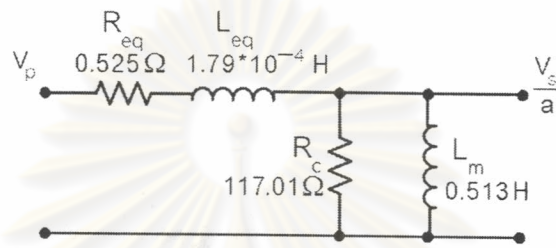
$$\frac{V_o}{V_i}(s) = \frac{aAs^2}{\left(\frac{r_o \cdot a^2}{R_o} + 1 + aAk\right)s^2 + \left(\frac{r_o}{L} + \frac{r_o \cdot a^2}{R_o \cdot R_c \cdot C_f} + \frac{1}{R_c \cdot C_f}\right)s + \frac{r_o}{R_c \cdot C_f \cdot L}} \dots \dots \dots \text{..สมการที่ 4.2}$$

จากฟังก์ชันถ่ายโอน เราสามารถทำนายลักษณะสมบัติเพื่อเลือกค่าพารามิเตอร์ให้กับวงจรในหัวข้อต่าง ๆ ได้ โดยสำหรับการออกแบบในขั้นต้น จะเลือกค่าพารามิเตอร์หลักบางตัวก่อนดังนี้

1. เลือกค่าอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลง โดยจะพิจารณาจากช่วงแรงดันด้านออกของออปแอมป์กำลังสูงที่จ่ายได้ ซึ่งจะมีค่าประมาณ -30 V ถึง 30 V ส่วนแรงดันขาออกที่ต้องการมีค่าเป็น $\pm 400 \text{ V}$ (ค่ายอดสูงสุดของสัญญาณรูปไซน์) ดังนั้นจึงเลือกค่าอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงเป็น 1:15 ทั้งนี้ ได้เพื่อเรื่องแรงดันตกคร่อมภายในขดลวดของหม้อแปลงไว้ด้วย

2. เลือกค่าอัตราขยายของวงจรป้อนกลับ k จากขนาดสัญญาณออกและสัญญาณเข้า เนื่องจาก k จะเป็นตัวกำหนดอัตราขยายของวงจร โดยสัญญาณออกสูงสุดเป็น 400 V และสัญญาณเข้าสูงสุดเป็น 5 V ดังนั้นจึงเลือกค่า k เป็น 1/80 เท่า โดยเลือกค่าความต้านทานแบ่งแรงดัน R_1 เป็น 395 k Ω และ R_2 เป็น 5 k Ω ดังนั้นค่าความต้านทานทางฝั่งทุติยภูมิ R_o จึงมีค่าเป็น 400 k Ω

3. ค่าความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็ก L ของหม้อแปลงสามารถหาได้โดยหาวงจรสมมูลของหม้อแปลงโดยวิธีทดสอบเปิดวงจรและลัดวงจร (Short-circuit test and open-circuit test) [9] ได้ดังรูป



รูปที่ 4.6 วงจรสมมูลของหม้อแปลงขยายแรงดัน

วงจรสมมูลที่แสดงในรูปที่ 4.6 นี้เป็นวงจรสมมูลทางฝั่งปฐมภูมิ (Primary side) ของหม้อแปลง โดยหม้อแปลงนี้มีอัตราส่วนจำนวนรอบเป็น a ซึ่งมีค่าเท่ากับ 15 V_p คือแรงดันทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลง V_s คือแรงดันทางฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลง R_{eq} คือ ความต้านทานสมมูลของขดลวดภายในหม้อแปลง L_{eq} คือความเหนี่ยวนำสมมูลของขดลวดซึ่งเป็นผลมาจากฟลักซ์รั่ว (Leakage flux) ภายในหม้อแปลง R_c คือ ความต้านทานของความสูญเสียในแกน (Core-loss resistance) และ L_m คือ ความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กของหม้อแปลง ดังนั้นค่า L ที่ใช้จึงเป็น 0.513 H

4. ความต้านทานขาออกของวงจรออปแอมป์ r_o นั้นไม่ได้ระบุไว้ในคู่มือของอุปกรณ์ และเนื่องจากวงจรต่อโดยใช้อัตราขยายเป็น 1 ดังนั้นความต้านทานขาออกน่าจะมีค่าต่ำ จึงประมาณให้ความต้านทานขาออกของวงจรออปแอมป์นี้มีค่าเป็น 0.1 Ω

จากที่กล่าวมาทั้งหมดจะพบว่า เหลือค่าที่ยังไม่ได้กำหนดอีก 3 ค่าสำหรับวงจรมันนั้นคือ ความต้านทานของตัวต้านทาน R_c และค่าความจุของตัวเก็บประจุ C_f ของวงจรถัดออกเฟส และค่าอัตราขยายของวิธีไปหน้า A ซึ่งเราจะเลือกโดยวิธีที่จะกล่าวต่อไปเพื่อให้วงจรขยายแรงดันที่ออกแบบได้มีสมบัติตามที่ได้ระบุไว้ตอนต้นของหัวข้อนี้ โดยจากวงจรในรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าเมื่อประมาณว่าออปแอมป์ทุกตัวเป็นออปแอมป์อุดมคติแล้ว ระบบนี้จะเป็นระบบอันดับสองตามที่ได้แสดงในฟังก์ชันถ่ายโอนในสมการที่ 4.2 และพารามิเตอร์ในวงจรที่สร้างซ้ำทั้งสองของระบบก็คือตัวเก็บประจุที่ใช้กันออกเฟส และ ตัวเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กในหม้อแปลง แต่เนื่องจากเราไม่

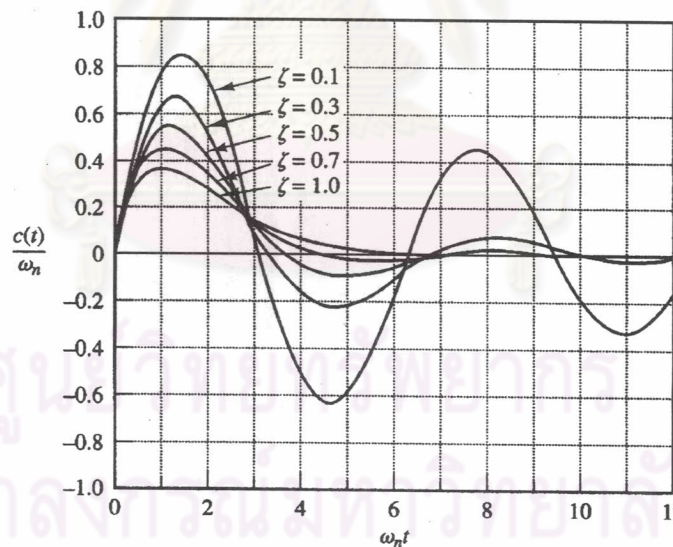
สามารถกำหนดค่าของตัวเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กซึ่งเป็นลักษณะสมบัติของหม้อแปลงได้ เราจึงมาเลือกปรับระบบด้วยการเปลี่ยนความจุของตัวเก็บประจุกันออฟเซตแทน ซึ่งตัวเก็บประจุนี้จะสร้างขั้วของระบบร่วมกับตัวต้านทานในวงจรกันออฟเซต ดังนั้นเราจะพิจารณาตัวแปรสองตัวนี้รวมกันในรูปของผลคูณของ R_c และ C_f ส่วนพารามิเตอร์อีกตัวหนึ่งที่มีส่วนสำคัญในการกำหนดสมบัติของระบบก็คือ A ซึ่งมีส่วนสำคัญในด้านเสถียรภาพของวงจร ดังนั้นจึงต้องนำมาพิจารณาเพื่อกำหนดสมบัติของวงจรด้วย ดังนี้

1. เสถียรภาพของวงจร

สำหรับระบบอันดับสองดังเช่นในสมการที่ 4.2 นั้น เราสามารถดูเสถียรภาพของวงจรได้ โดยดูที่ค่าอัตราการหน่วง (Damping ratio; ζ) ของสมการลักษณะสมบัติของฟังก์ชันถ่ายโอน โดยเทียบกับสมการต้นแบบของระบบอันดับสองดังนี้

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \dots\dots\dots \text{สมการที่ 4.3}$$

ค่าอัตราการหน่วง ζ ในสมการจะเป็นตัวระบุถึงเสถียรภาพของวงจร และผลตอบของระบบดังตัวอย่างผลตอบสนองสัญญาณอิมพัลส์ (Impulse response) ของระบบอันดับสองที่ค่าอัตราการหน่วงต่าง ๆ ในรูปที่ 4.7 [8]



รูปที่ 4.7 ผลตอบสนองทางเวลาของสัญญาณอิมพัลส์ของระบบอันดับสองที่ค่าอัตราการหน่วงต่าง ๆ

จากรูป จะเห็นว่าค่าอัตราการหน่วง ζ จะอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยเมื่อค่าอัตราการหน่วง เข้าใกล้ 1 มากขึ้นระบบจะมีเสถียรภาพที่ดีขึ้นแต่ก็ตอบสนองต่อสัญญาณเข้าได้ช้าลง และเมื่อลดค่าอัตราการหน่วงลงถึง 0 ระบบจะขาดเสถียรภาพทำให้ได้สัญญาณออกที่มีลักษณะแกว่ง (Oscillate) ดังนั้นสำหรับในระบบที่กล่าวถึง เราจะพิจารณาเสถียรภาพของระบบโดยเลือกค่า

พารามิเตอร์ของวงจรถูกเพื่อให้ระบบมีค่าอัตราความถี่ที่มากเพียงพอ ซึ่งสำหรับในที่นี้เลือกให้อัตราความถี่มีค่ามากกว่า 0.7 โดยจากสมการที่ 4.2 เราจะมองสัมประสิทธิ์ของ s ในรูปของตัวแปร A, B, C และ D ดังนี้

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{As^2}{Bs^2 + Cs + D} \dots\dots\dots \text{สมการที่ 4.4}$$

โดยที่

$$A = aA$$

$$B = \frac{r_o \cdot a^2}{R_o} + 1 + aAk$$

$$C = \frac{r_o}{L} + \frac{r_o \cdot a^2}{R_o \cdot R_c \cdot C_f} + \frac{1}{R_c \cdot C_f}$$

$$D = \frac{r_o}{R_c \cdot C_f \cdot L}$$

เมื่อเทียบสมการที่ 4.3 และ 4.4 จะได้ว่า $\zeta = \frac{C}{2\sqrt{BD}}$ และ $\omega_n = \sqrt{\frac{D}{B}}$ ซึ่งเมื่อแทนค่าสัมประสิทธิ์ลงในสมการ $\zeta > 0.7$ แล้วจะได้สมการที่ระบุขอบเขตของพารามิเตอร์ดังนี้

$$A < \left[\left(\frac{r_o}{L} + \frac{r_o a^2}{R_o R_c C_f} + \frac{1}{R_c C_f} \right)^2 \cdot \frac{R_c C_f L}{r_o} \cdot \frac{1}{1.96} - 1 - \frac{r_o a^2}{R_o} \right] \cdot \frac{1}{ak} \dots\dots\dots \text{สมการที่ 4.5}$$

ซึ่งเมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้กำหนดไว้แล้วลงไปจะได้สมการเป็น

$$A < \left[\left(0.195 + \frac{5.625 \cdot 10^{-5}}{R_c C_f} + \frac{1}{R_c C_f} \right)^2 \cdot \frac{R_c C_f}{0.195} \cdot \frac{1}{1.96} - 1 - 5.625 \cdot 10^{-5} \right] \cdot 0.1875$$

.....สมการที่ 4.6

เราจะใช้สมการนี้เป็นหนึ่งในข้อกำหนดในการเลือกค่าพารามิเตอร์ของวงจรถูก ดังรายละเอียดที่จะกล่าวถึงในภายหลัง

2. ความต่างเฟสของสัญญาณออก

วงจรถูกขยายแรงดันที่ออกแบบ ถูกออกแบบมาให้ขยายขนาดสัญญาณด้านเข้าโดยไม่ทำให้สมบัติอื่น ๆ ของสัญญาณเปลี่ยนแปลงไป ไม่ว่าจะเป็นความถี่เชิงฮาร์มอนิก หรือ ความต่างเฟสระหว่างสัญญาณเข้าและสัญญาณออก แต่ในความเป็นจริงระบบที่สร้างจะมีความไม่เป็นอุดมคติทำให้สัญญาณออกมีเฟสที่ต่างไปจากสัญญาณเข้าซึ่งเป็นลักษณะสมบัติที่ไม่ต้องการให้มีอยู่ ดังนั้นจึงต้องออกแบบให้วงจรถูกขยายแรงดันนี้ให้สัญญาณออกมีเฟสคลาดเคลื่อนไปจากสัญญาณเข้าให้น้อยที่สุด โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะกำหนดให้สัญญาณออกมีเฟสต่างไปจากสัญญาณเข้าได้ไม่เกิน 0.5 องศา รายละเอียดเป็นดังนี้

เนื่องจากในระบบนี้จ่ายสัญญาณเข้าเป็นสัญญาณรายคาบรูปไซน์ (Sinusoidal input) ดังนั้นสัญญาณออกจากระบบที่ได้ที่สถานะอยู่ตัวจะเป็นสัญญาณรูปไซน์ด้วยเช่นกัน แต่มีการเลื่อนเฟสไปจากสัญญาณเข้า โดยเฟสอาจจะตามหรือนำสัญญาณเข้าก็ได้ขึ้นกับลักษณะของระบบ จาก [8] ระบุว่าเราสามารถหาความต่างเฟสของสัญญาณออกที่เลื่อนไปจากสัญญาณเข้าได้จากมุมเฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนสำหรับระบบที่มีสัญญาณเข้าเป็นรูปไซน์ (Sinusoidal transfer function) ซึ่งหาได้โดยการแทน s ในฟังก์ชันถ่ายโอน (สมการที่ 4.4) ด้วย $j\omega$ ได้เป็น

$$\angle \frac{V_o}{V_i}(j\omega) = \angle \frac{-A\omega^2}{(D - B\omega^2) + j\omega C} = 180^\circ - \arctan\left(\frac{\omega C}{D - B\omega^2}\right) \dots\dots\dots \text{สมการที่ 4.7}$$

ซึ่งเมื่อจำกัดให้ค่าความต่างเฟสไม่เกิน 0.5 องศา และแทนค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ลงไปจะได้ อสมการแสดงความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์เพื่อให้ได้ความต่างเฟสอยู่ในกำหนดเป็นดังนี้

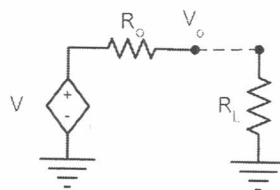
$$A > \left[\left(\frac{r_o}{L} + \frac{r_o a^2}{R_L R_c C_f} + \frac{1}{R_c C_f} \right) * \frac{\omega}{8.727 * 10^{-3}} + \frac{r_o}{R_c C_f L} - \left(\frac{r_o a^2}{R_L} + 1 \right) * \omega^2 \right] * \frac{1}{a\omega^2} \dots\dots\dots \text{อสมการที่ 4.8}$$

โดยที่ R_L คือความต้านทานขาออกที่ค่าโหลดพิกัดของวงจร เนื่องจากความต่างเฟสเปลี่ยนแปลงตามค่าโหลด โดยเมื่อค่าโหลดลดลง ค่าความต่างเฟสจะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นเราจะพิจารณาเลือกค่าจากกรณีที่จะทำให้เกิดความต่างเฟสมากที่สุดเพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่ครอบคลุมทุกกรณี เนื่องจากโหลดของวงจรจะต่อขนานกับความต้านทานโหลดซึ่งมีค่าเป็น 4840 Ω (คิดจากการที่มิเตอร์ต้องสามารถจ่ายกำลัง 10 W ได้ที่แรงดัน 220 V_{rms} ซึ่งเทียบเท่ากับการจ่ายกำลังทดสอบมิเตอร์ได้ 5 ตัว) ดังนั้นจึงต้องแทนค่า R_o เดิมในสมการด้วย R_L ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์เป็น

$$A > \left[\left(0.195 + \frac{4.65 * 10^{-3}}{R_c C_f} + \frac{1}{R_c C_f} \right) * \frac{314.159}{8.727 * 10^{-3}} + \frac{0.195}{R_c C_f L} - \left(4.65 * 10^{-3} + 1 \right) * 314.159^2 \right] * \frac{1}{314.159^2} \dots\dots\dots \text{อสมการที่ 4.9}$$

3. การคงค่าแรงดัน

การคงค่าแรงดันคือความสามารถในการคงค่าแรงดันด้านออกของวงจรให้คงที่เมื่อโหลดของวงจรเปลี่ยนแปลงไป โดยจะบอกค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ กรณีตัวอย่างเป็นดังนี้



รูปที่ 4.8 วงจรสมมูลเพื่อหาการคงค่าแรงดัน

สำหรับการหาการคงค่าแรงดัน เราจะเขียนวงจรสมมูลด้านออกของวงจรที่เราต้องการวิเคราะห์ในรูปแบบของวงจรสมมูลเทเวนิน (Thevenin equivalent circuit) ที่ประกอบไปด้วยแหล่งแรงดันขาออกที่จ่ายแรงดัน V และตัวต้านทานขาออกของวงจร R_o ในภาวะที่ไม่มีโหลด วงจรจะไม่มีกระแสไหลผ่านตัวต้านทานขาออกทำให้ไม่มีแรงดันตกคร่อม และสัญญาณแรงดันออกเป็น V_o แต่ในกรณีที่มีโหลดความต้านทาน R_L เข้ามาต่อกับวงจร วงจรจะมีการจ่ายกระแสและมีแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานขาออกทำให้แรงดันออกที่ได้ลดลงไปจากเดิม สำหรับวงจรนี้เราสามารถคำนวณหาการคงค่าแรงดันได้ โดยจากนิยามของการคงค่าแรงดัน (Voltage regulation ;VR)

$$VR(\%) = \frac{V_{nl} - V_{fl}}{V_{fl}} * 100 \dots\dots\dots \text{สมการที่ 4.10}$$

โดยที่ V_{nl} คือ แรงดันขาออกของวงจรเมื่อไม่มีโหลด และ V_{fl} หมายถึง แรงดันขาออกของวงจรเมื่อมีโหลดพิกัดมาต่อ สำหรับวงจรในรูปที่ 4.8 เราสามารถหาการคงค่าแรงดันได้เป็น

$$VR(\%) = \frac{R_o}{R_L} * 100 \dots\dots\dots \text{สมการที่ 4.11}$$

ดังนั้นจากสมการที่ 4.11 จะเห็นว่าถ้าความต้านทานขาออก R_o ของวงจรมีค่าน้อย การคงค่าแรงดันของวงจรก็จะยิ่งดีขึ้น ซึ่งสำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดไว้ว่าต้องการให้การคงค่าแรงดันของวงจรมีค่าไม่เกิน 0.1 % ทำให้สามารถสร้างข้อกำหนดสำหรับการเลือกค่าพารามิเตอร์ได้ โดยการหาความต้านทานขาออกของวงจร หรือก็คือการหาค่า R'_o .วงจรสมมูลในรูปที่ 4.5 ซึ่งหาค่าได้เป็น

$$R'_o = \frac{r_o a^2 Z}{Z(1+aA'k) + r_o} \dots\dots\dots \text{สมการที่ 4.12}$$

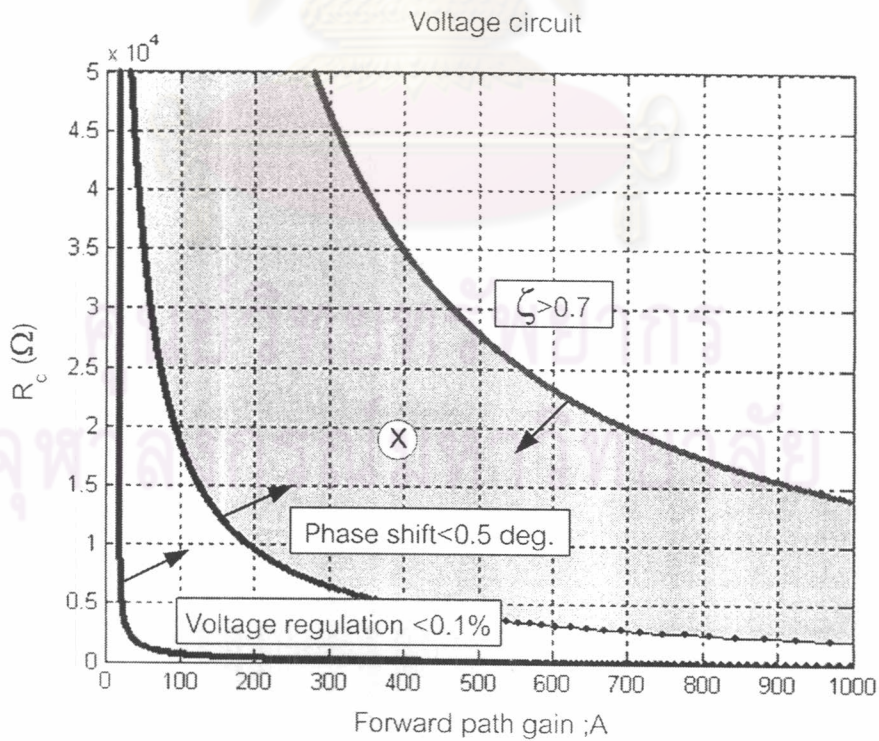
โดยที่ $A' = \frac{R_c C_f s}{R_c C_f s + 1} \cdot A$ Z คือ ขนาดอิมพีแดนซ์รวมระหว่างค่าตัวเหนี่ยวนำทำแม่เหล็ก L ของหม้อแปลงกับค่าความต้านทานขาออกที่ถูกย้ายผ่านหม้อแปลง $\frac{R_o}{a^2}$ ซึ่งมีค่าเป็น $\frac{R_o sL}{R_o + sLa^2}$ ดังนั้นเมื่อแทนค่าหาขนาดของ R'_o ด้วยการแทน $s = j\omega$ แล้วหาขนาดของค่าที่ได้ไม่ให้เป็น 0.1 % จะได้ความสัมพันธ์

$$A \geq \left[\frac{1000 r_o a^2}{R_L} - \frac{r_o \sqrt{R_o^2 + (\omega La^2)^2}}{\omega L R_o} - 1 \right] \cdot \frac{1}{ak} \cdot \frac{\sqrt{(R_c C_f \omega)^2 + 1}}{R_c C_f \omega} \dots\dots\dots \text{สมการที่ 4.13}$$

ค่า R_L ในวงจร คือ ความต้านทานโหลดของวงจรที่ค่าพิกัด (4840 Ω) ส่วนความถี่ที่ใช้คือ 50 Hz ดังนั้นสามารถแทนค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้แล้วได้เป็น

$$A \geq \left[4.65 - \frac{0.1}{160.51} - 1 \right] \cdot 0.1875 \cdot \frac{\sqrt{(R_c C_f 314.159)^2 + 1}}{R_c C_f 314.159} \dots\dots\dots \text{อสมการที่ 4.14}$$

เราจะนำอสมการกำหนดขอบเขตทั้งสาม (อสมการที่ 4.6 ,อสมการที่ 4.9 และอสมการที่ 4.14) มาวาดกราฟในกราฟเดียวกัน โดยจะกำหนดค่า C_f ไว้ล่วงหน้าเป็น 1 μF สาเหตุที่ต้องเลือกค่า C_f เป็นค่าสูงก็เพื่อให้ผลคูณ $R_c C_f$ มีค่าสูงซึ่งมีผลทำให้วงจรกันออฟเซตไม่ลดทอนแรงดันลงมากเกินไปเพราะจะทำให้ช่วงแรงดันขาออกที่จ่ายได้มีคาลดลง และจะวาดกราฟโดยแสดงตัวแปรเป็น R_c และ A ดังรูปที่ 4.9 พื้นที่ที่ถูกละกของแต่ละกราฟซึ่งจะหมายถึงพื้นที่ที่สอดคล้องกับอสมการข้อกำหนดนั้น ๆ ส่วนพื้นที่ที่แรเงาจะหมายถึงพื้นที่ซึ่งสอดคล้องกับข้อกำหนดทั้งสาม ซึ่งจากกราฟจะเห็นว่าข้อกำหนดของเฟสจะครอบคลุมข้อกำหนดของการคงค่าแรงดันทั้งหมด เราจะเลือกค่า A และ R_c จากจุดในพื้นที่ที่แรเงามาเป็นพารามิเตอร์ของวงจร โดยจุดที่เลือกคือ $A = 400$ เท่า และ $R_c = 18\text{k}\Omega$ ซึ่งเป็นจุดที่สอดคล้องกับข้อกำหนดทั้งหมด ซึ่งเมื่อแทนค่ากลับจะพบว่าค่าที่เลือกมานี้ทำให้ได้ค่า $\zeta = 0.9717$, Phase shift = 0.1344 องศา (แทนค่า R_o ด้วย $R_L = 4840 \Omega$) และ Voltage regulation = 0.0062 % ซึ่งผ่านข้อกำหนดที่ออกแบบทุกข้อ

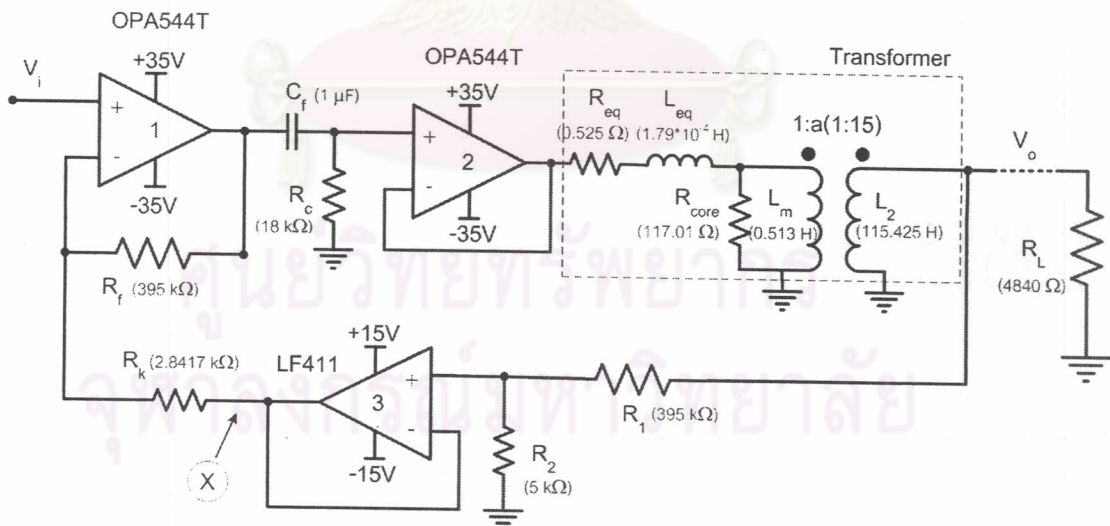


รูปที่ 4.9 การเลือกค่าพารามิเตอร์ A และ R_c ตามข้อกำหนดสำหรับวงจรขยายแรงดัน

4.2.3 การปรับปรุงวงจร

เมื่อทดลองต่อวงจรโดยปรับค่าพารามิเตอร์ให้เป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้พบว่าวงจรขาดเสถียรภาพและไม่สามารถทำงานได้ จึงทำการแก้ไขเบื้องต้นโดยลดค่าอัตราขยายของวงจรลงมาจากเนื่องจากมีแนวโน้มที่จะทำให้เสถียรภาพมากขึ้น (ค่า ζ มากขึ้นจากรูปที่ 4.9) โดยจะลดให้เป็นค่าอัตราขยายค่าต่ำที่ยังผ่านข้อกำหนด จากกราฟที่ 4.9 ที่ค่า R_c เป็น $18 \text{ k}\Omega$ จะได้อัตราขยายดังกล่าวเป็น 140 เท่า ซึ่งค่า R_c และ A นี้เมื่อแทนค่ากลับไปเพื่อหาสมบัติของวงจรจากที่ออกแบบจะได้ว่า $\zeta = 1.623$, Phase shift = 0.375 และ Voltage regulation = 0.0173% ซึ่งจะเห็นว่าค่า ζ มากขึ้นซึ่งน่าจะทำให้เสถียรภาพของระบบดีขึ้น ส่วนค่าอื่น ๆ จะตกลงตามแนวโน้มที่เห็นในกราฟรูปที่ 4.9 แต่ก็ยังผ่านข้อกำหนดที่เสนอไว้ ผลการทดลองต่อวงจรพบว่าระบบยังขาดเสถียรภาพอยู่ซึ่งจำเป็นต้องมีการแก้ไขต่อไป

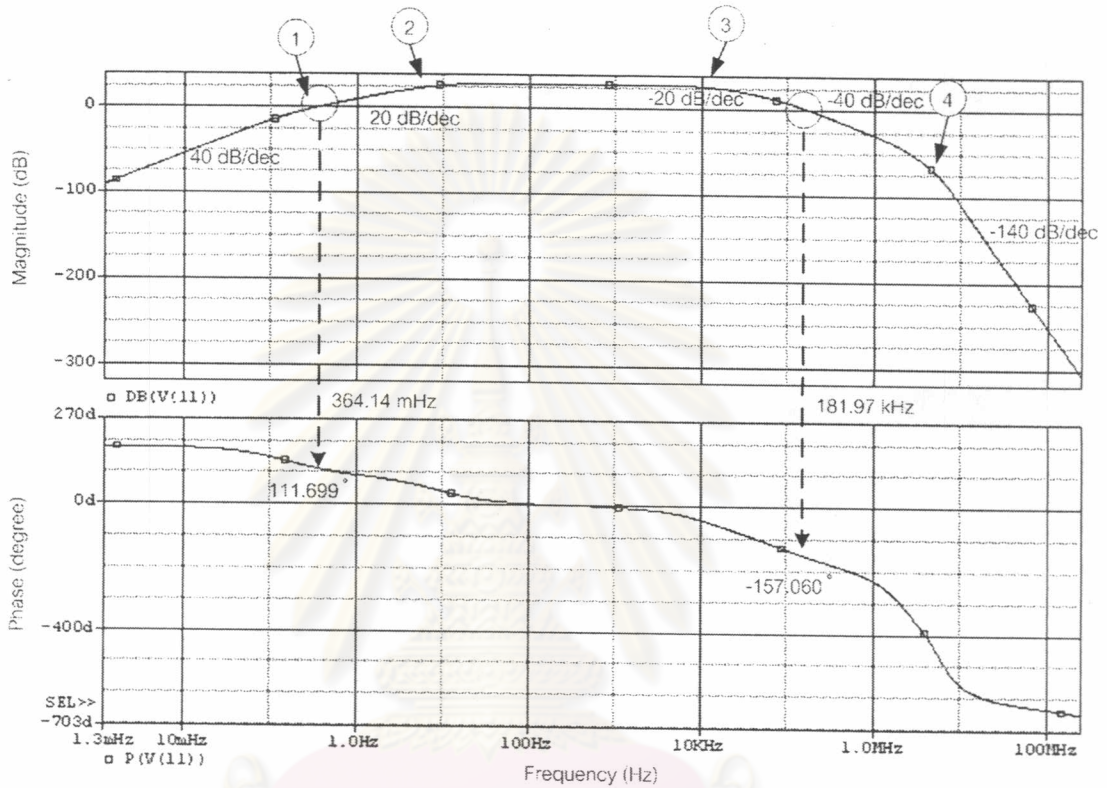
เราจำเป็นต้องหาสาเหตุของการขาดเสถียรภาพและทำการแก้ไขปรับปรุง โดยเริ่มต้นด้วยการวิเคราะห์วงจรโดยจำลองการทำงานของวงจร โดยจากค่าที่ออกแบบไว้ เราสามารถจำลองการทำงานของวงจรได้โดยใช้แบบจำลองวงจรของออปแอมป์เบอร์ OPA544T และ LF411 ที่ผู้ผลิตให้มา ส่วนหม้อแปลงก็ใช้แบบจำลองหม้อแปลงทั้งหมด (ที่แสดงในเส้นประในรูปที่ 4.10) ที่ได้นำเสนอไว้ในรูปที่ 4.6 ทั้งนี้เพื่อศึกษาผลของส่วนที่ได้ละเลยไปตอนออกแบบก่อนที่จะทดลองต่อวงจรจริงด้วย โปรแกรมที่ใช้คือ OrCAD Pspice วงจรที่จะทำการจำลองการทำงานเป็นดังรูปที่ 4.10 โดยจะมีความต้านทานมาต่อเป็นโหลดขนาด 4840Ω เพื่อทดสอบการคงค่าแรงดันของวงจรด้วย



รูปที่ 4.10 วงจรขยายแรงดันที่ออกแบบไว้และถูกนำไปจำลองการทำงาน

จากผลการจำลองการทำงานของวงจร เราจะดูเสถียรภาพของวงจรจากส่วนเผื่อของเฟส (Phase margin) ของวงจรโดยดูที่ผลตอบสนองเชิงความถี่ของระบบวงเปิด (Open-loop frequency response) ซึ่งหาโดยดูเฟสของสัญญาณป้อนกลับของระบบวงเปิดที่เลื่อนไปจาก

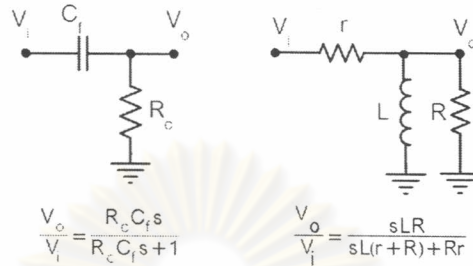
สัญญาณเข้าที่ความถี่ที่ทำให้ขนาดของอัตราขยายวงเปิดเป็นหนึ่งว่าต่ำกว่า 180 องศาเท่าไร (ในกรณีอัตราขยายเพิ่มขึ้นตัด 0 เดซิเบล) หรือเกิน -180 องศาอยู่เท่าไร (ในกรณีของอัตราขยายลดลงตัด 0 เดซิเบล) การจำลองการทำงานของระบบวงเปิดทำได้โดยเปิดวงจรที่จุด X ในรูปที่ 4.10 แล้วลัดวงจร R_x ลงดิน สัญญาณออกของวงเปิดคือสัญญาณออกจากวงจรออปแอมป์หมายเลข 3 ซึ่งแสดงอยู่ในกราฟผลตอบความถี่ในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของขนาดและเฟสของระบบวงเปิดของวงจรรายแรงดัน

กราฟบนในรูปเป็นกราฟระหว่างอัตราขยายของระบบวงเปิดหน่วยเป็นเดซิเบล (dB) กับความถี่ของสัญญาณหน่วยเป็น Hz ส่วนกราฟล่างเป็นกราฟระหว่างเฟสของสัญญาณออกของระบบวงเปิดที่เลื่อนไปจากสัญญาณเข้าหน่วยเป็นองศา กับ ความถี่ของสัญญาณหน่วยเป็น Hz จุดที่แสดงในกราฟบนคือจุดที่อัตราขยายวงเปิดมีค่าเป็นหนึ่งหรือขนาดเป็น 0 dB โดยสำหรับด้านขาขึ้นจะเกิดที่ความถี่ 364.14 mHz ซึ่งที่จุดนี้มีการเลื่อนเฟสของสัญญาณออกเป็น 111.699 องศา ซึ่งหมายถึงมีค่าส่วนเผื่อของเฟสเป็น 68.301 องศา ส่วนที่อัตราขยายเป็นศูนย์ด้านขาลงอยู่ที่ความถี่ 181.97 kHz ส่วนจุดในกราฟล่างซึ่งจุดที่ความถี่เดียวกันว่ามีเฟสของสัญญาณออกเลื่อนไป -157.060 องศา แสดงว่ามีค่าส่วนเผื่อของเฟสเป็น 22.94 องศา ซึ่งจากค่าส่วนเผื่อของเฟสที่หาได้ทั้งสองแสดงให้เห็นว่าระบบยังมีเสถียรภาพ โดยสำหรับที่ความถี่ต่ำถือว่ามีความเสถียรภาพค่อนข้างดี (ระบบที่มีความเสถียรภาพที่ดีควรมีค่าส่วนเผื่อของเฟสเกิน 60 องศา) ส่วนที่ความถี่สูงจะมีความเสถียรภาพค่อนข้างต่ำซึ่งจำเป็นต้องมีการแก้ไขต่อไป

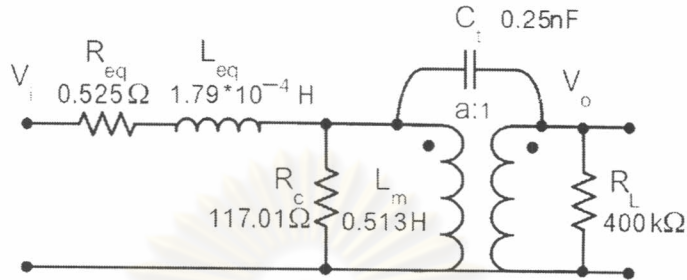
สำหรับระบบที่ออกแบบตามวงจรในรูปที่ 4.10 นั้น ตามที่ได้แสดงให้เห็นในฟังก์ชันถ่ายโอน จะเห็นว่าระบบมีสองขั้ว (Pole) และสองศูนย์ (Zero) ซึ่งคู่หนึ่งนั้นมาจากความต้านทานและค่าตัวเก็บประจุของวงจรถักออฟเซต ดังรูปซ้ายมือของรูปที่ 4.12 ซึ่งมีค่าขั้วเป็น $\frac{1}{2\pi R_c C_f}$ และแทนค่าได้เป็น 8.84 Hz (ประมาณตำแหน่งหมายเลข 2 ในรูปที่ 4.11) โดยศูนย์จะอยู่ที่จุดกำเนิด



รูปที่ 4.12 วงจรอย่างง่ายแสดงส่วนสร้างขั้วและศูนย์ของระบบ

ส่วนอีกหนึ่งคู่จะมาจากความเหนี่ยวนำและความต้านทาน ดังวงจรสมมูลโดยประมาณในรูปที่ 4.12 ด้านขวามือ ซึ่งมี ค่าขั้วเป็น $\frac{Rr}{2\pi L(r+R)}$ เมื่อ R แทนความต้านทานขาออกที่ถูกย้ายผ่านอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลง r แทนความต้านทานขาออกของวงจรรอบแอมป์ที่ขับหม้อแปลงรวมกับความต้านทานสมมูลของหม้อแปลง L แทนความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กของหม้อแปลง เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากรูปที่ 4.10 จะได้ค่าความถี่เป็น 0.196 Hz (ตำแหน่งหมายเลข 1 ในรูปที่ 4.11) ส่วนค่าศูนย์จะอยู่ที่จุดกำเนิดเช่นกัน ซึ่งจากค่าที่กล่าวมาจะเห็นว่าวงจรควรมีแค่สองขั้วนี้ในช่วงความถี่ต่ำเท่านั้น ซึ่งเสถียรภาพที่ออกแบบไว้ตั้งแต่ต้นก็จะเป็นค่าที่ส่วนนี้ซึ่งจะเห็นว่าเสถียรภาพด้านความถี่ต่ำค่อนข้างดี แต่ในผลการจำลองการทำงานที่ได้จะพบว่าในช่วงความถี่สูงก็มีผลจากขั้วซึ่งเป็นลักษณะสมบัติของอุปกรณ์มาเกี่ยวข้อง โดยจากรูปที่ 4.11 ตำแหน่งหมายเลข 3 จะมีผลจากขั้วสองขั้ว (เนื่องจากความชันเปลี่ยนจากศูนย์ไปเป็น -40 dB/decade) ขั้วหนึ่งเป็นผลมาจากลักษณะสมบัติของออปแอมป์ OPA544T โดยจากคู่มืออุปกรณ์ [10] จะสามารถระบุได้ว่าที่อัตราขยาย 140 เท่า ออปแอมป์นี้มีความกว้างแถบ (Bandwidth) ประมาณ 10 kHz ส่วนอีกขั้วจะเป็นผลมาจากความเหนี่ยวนำสมมูลของหม้อแปลง โดยจะเกิดผลที่ความถี่ประมาณ 10 kHz เช่นกัน ส่วนหลังจากความถี่ 1 MHz ขึ้นไปจะพบว่าจะประกอบไปด้วยผลของขั้วถึง 7 ขั้วด้วยกัน (เนื่องจากความชันเป็น -140 dB/decade) ส่วนนี้ก็ไม่น่าจะมีผลมาจากขั้วของออปแอมป์ตัวอื่น ๆ และขั้วความถี่สูงที่สองของออปแอมป์แต่ละตัวนั่นเอง ซึ่งส่วนนี้จะไม่จำเป็นต้องสนใจเนื่องจากเลยความถี่ที่กำหนดส่วนเผื่อของเฟสไปแล้ว ดังนั้นจากที่กล่าวมาจึงสามารถสรุปได้ว่าเสถียรภาพที่ความถี่สูงมีผลมาจากความกว้างแถบของออปแอมป์ตัวที่ต่อวงจรให้มีอัตราขยายสูงและความเหนี่ยวนำสมมูลของหม้อแปลง ซึ่งส่วนนี้กลายมาเป็นตัวกำหนดเสถียรภาพรวมของวงจรแทนที่เสถียรภาพที่ความถี่ต่ำซึ่งเป็นค่าที่ได้ออกแบบไว้ แต่ถึง

อย่างไรก็ตามระบบก็น่าจะทำงานได้แม้จะมีเสถียรภาพต่ำ แต่จากการทดลองนั้นพบว่าระบบขาดเสถียรภาพโดยสิ้นเชิง ซึ่งแสดงว่ายังมีพารามิเตอร์อื่นใดที่ได้ละเลยไปจากการพิจารณาอีก และสุดท้ายก็พบว่า พารามิเตอร์ตัวที่ทำให้วงจรขาดเสถียรภาพดังที่ทดลองได้ก็คือ ค่าความจุระหว่างขดลวดของหม้อแปลงดังแสดงในรูปที่ 4.13 ซึ่งวัดค่าโดยใช้อุปกรณ์วัดค่าความจุได้เป็น 0.25 nF



รูปที่ 4.13 แสดงค่าความจุแฝงที่เกิดในขดลวดของหม้อแปลง

จากวงจร สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรร้อยนี้ได้เป็น

$$\frac{V_o}{V_i}(s) = \frac{\frac{a}{C_t} s}{L_{eq}(a-1)^2 s^3 + (L_{eq}(\frac{1}{R_c C_t} + \frac{a^2}{C_t R_L}) + R_{eq}(a-1)^2) s + \frac{1}{C_t} (1 + \frac{R_{eq}}{R_c} + \frac{L_{eq}}{L_m} + \frac{a^2 R_{eq}}{R_L}) s + \frac{R_{eq}}{L_m C_t}}$$

.....สมการที่ 4.15

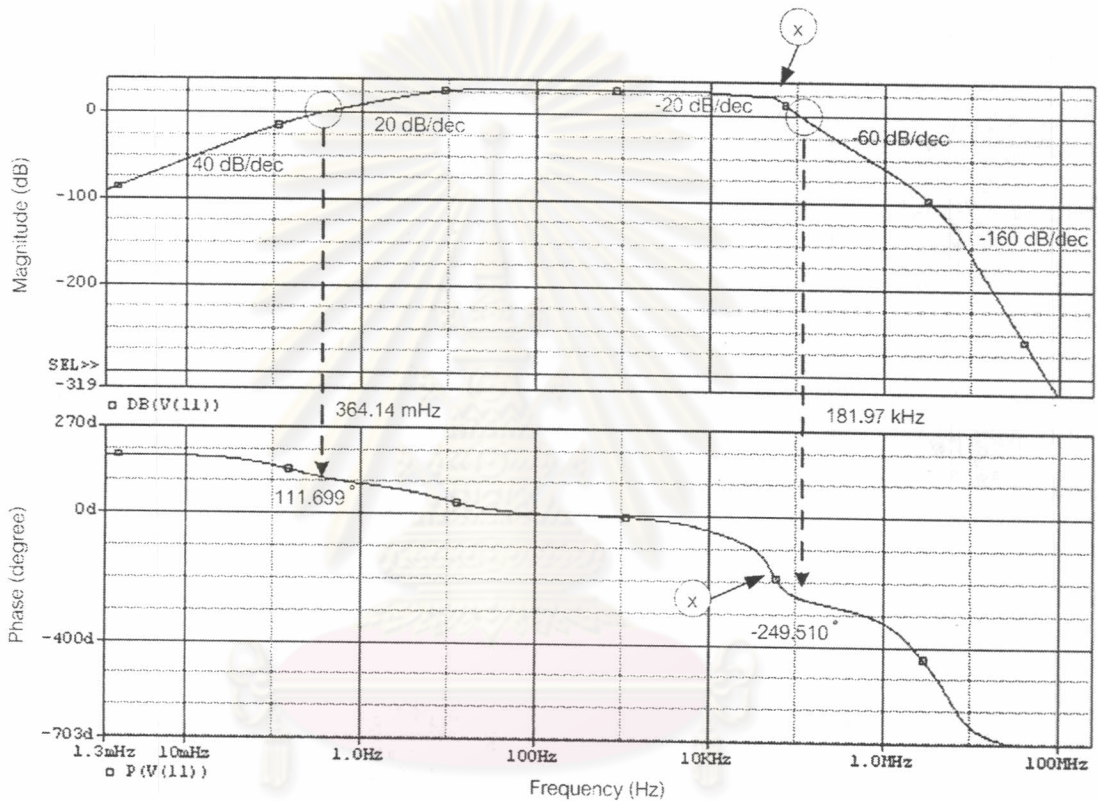
ซึ่งเมื่อแทนค่าตัวแปรลงในสมการแล้วจัดรูปจะได้เป็น

$$\frac{V_o}{V_i}(s) = \frac{s}{(s + 1.018)(s + 94410.7 - 325088.94 \cdot i)(s + 94410.7 + 325088.04 \cdot i)}$$

.....สมการที่ 4.16

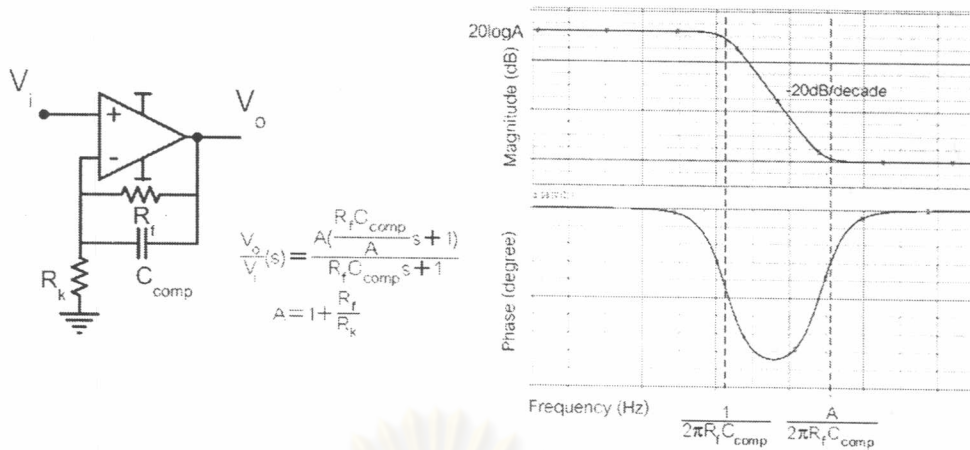
จากสมการที่ 4.16 จะเห็นว่าระบบมีศูนย์อยู่ที่จุดกำเนิด และมีขั้วสามขั้วซึ่งมีค่าเป็น -1.018 rad/s และ -94410.7 ± 325088.94i rad/s ซึ่งเราจะพบว่าขั้วแรกจะเป็นขั้วที่เกิดจากความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กของหม้อแปลงและความต้านทานที่ขนานกับตัวมันดังที่ได้เคยกล่าวไว้แล้วในตอนต้น (ตำแหน่งหมายเลข 1 ในรูปที่ 4.11) ส่วนสองขั้วที่เหลือจะเป็นผลมาจาก C_t และ L_{eq} ในวงจร มีลักษณะเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนกำลังสองดังสมการที่ 4.3 ซึ่งมีค่า ω_n เป็น 53.88 kHz และค่า ζ เป็น 0.2789 ซึ่งจะเห็นว่าค่า ζ นั้นมีค่าต่ำมากซึ่งทำให้ลักษณะผลตอบความถี่ของวงจรมีเฟสที่ลดลงอย่างรวดเร็วที่ความถี่ ω_n ดังนั้นจากรูปที่ 4.11 จะเห็นว่าผลจากการมี C_t ของหม้อแปลงจะทำให้เฟสที่ความถี่ประมาณ 53.88 kHz ลดลงอย่างรวดเร็วมีผลทำให้ส่วนเหนือของเฟสของวงจรตกลงอย่างมาก ซึ่งเมื่อลองเพิ่ม C_t เข้าไปในวงจรในรูปที่ 4.10 แล้วจำลองการทำงานพบว่าได้ผลตอบสนองความถี่ของระบบวงเปิดเป็นดังรูปที่ 4.14 จากรูปจะเห็นว่าการใส่ C_t ในวงจรสมมูลหม้อ

แปลงจะมีผลที่ความถี่สูงเท่านั้น โดยที่ความถี่ต่ำจะมีส่วนของเฟสเท่าเดิมและตำแหน่งของขั้วก็เป็นที่เดิม ผลจะไปปรากฏที่จุด X ซึ่งเดิมเป็นช่วงที่มีผลจากขั้วของ L_{eq} อย่างเดียว (ปัจจุบันมีขั้วของ C_1 เพิ่มเข้ามาอีก 1 ขั้ว) จะเห็นว่าผลจากการจำลองการทำงานที่ได้เป็นไปตามที่ได้กล่าวไว้ ด้านบนนั่นคือ มีผลของขั้วสองขั้วที่ตำแหน่งประมาณ 53.88 kHz จากรูป ที่ความถี่ที่จุด X เฟสของสัญญาณออกจะลดลงอย่างรวดเร็ว (จะถูกดึงลง 180 องศาเนื่องจากมีสองขั้ว) เนื่องจากค่า ζ ที่มีค่าต่ำดังที่ได้กล่าวไว้ ทำให้ส่วนเหนือของเฟสที่ความถี่สูงมีค่าเป็น -69.51 องศา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบขาดเสถียรภาพ



รูปที่ 4.14 ผลตอบสนองของความถี่ของระบบวงเปิดเมื่อมีค่าความจุแฝงในวงจรสมมูลหม้อแปลง

การแก้ไขเสถียรภาพของวงจรถ้าทำได้โดยการกำหนดขั้วให้ระบบวงเปิดแทนขั้วที่เป็นผลจากค่าความจุแฝงในหม้อแปลง ซึ่งในที่นี้ทำโดยใส่ตัวเก็บประจุขนานกับความต้านทาน R_f ในรูปที่ 4.10 ทำให้ลักษณะวงจรถ้าหนดอัตราขยายในวิถีไปหน้าเป็นดังรูป

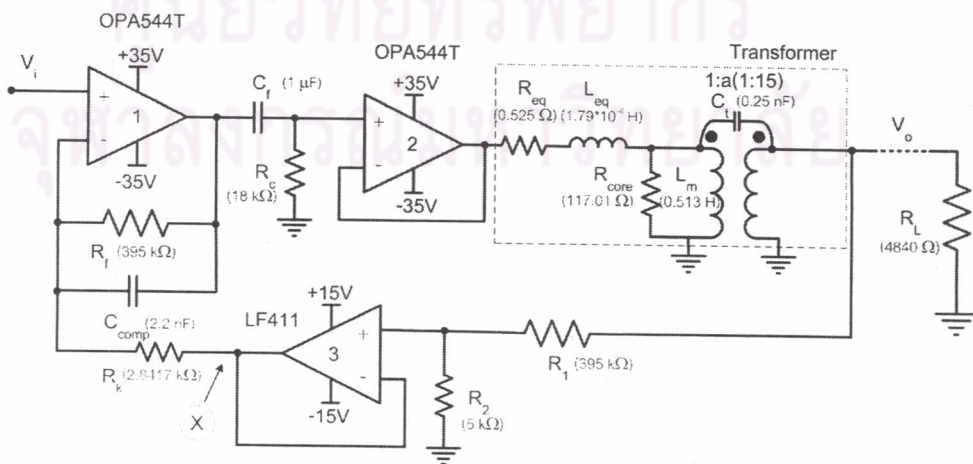


รูปที่ 4.15 วงจรปรับอัตราขยายในวิถีไปหน้าที่เพิ่มตัวเก็บประจุเพื่อกำหนดขั้วให้วงจร

จากรูปจะเห็นว่าระบบมีขั้วอยู่ที่ความถี่ $\frac{1}{2\pi R_f C_{comp}}$ ส่วนศูนย์อยู่ที่ความถี่มากกว่าขั้วเป็น

A เท่า อัตราขยายที่ความถี่ศูนย์ของวงจรจะมีค่าเท่าเดิมโดยไม่ขึ้นกับค่าความจุที่ใส่เข้ามาเพิ่ม ดังนั้นเราจึงสามารถเลือกค่าความจุที่จะนำมาใส่ได้เลยโดยไม่ต้องคำนึงถึงอัตราขยายของวงจร เรา
จะเลือกค่า C_{comp} โดยมีหลักการว่า ให้ขั้วที่จะออกแบบนี้ไปมีผลก่อนที่ขั้วของค่าความจุแฝงจะมี
ผล เพื่อให้การลดเฟสเพื่อกำหนดส่วนเผื่อของเฟสเกิดขึ้นโดยขั้วใหม่ ซึ่งจากการทดลองแทนค่าพบว่า
ค่าที่เหมาะสมคือ $C_{comp} = 2.2 \text{ nF}$ ซึ่งจะทำให้วงจรขยายในส่วนนี้มีขั้วอยู่ที่ความถี่ 183.15 Hz
และศูนย์อยู่ที่ความถี่ 72.53 kHz ซึ่งเมื่อนำไปแทนในวงจรที่ออกแบบและจำลองการทำงานวงเปิด
จะพบว่าระบบมีส่วนเผื่อของเฟสเป็น 99.79 องศา แสดงให้เห็นว่าระบบมีเสถียรภาพดี

การชดเชยเสถียรภาพของระบบนี้อาจมีผลทำให้สมบัติบางประการของระบบเปลี่ยนแปลง
ไปได้ดังนั้นจึงจะทำการจำลองการทำงานของระบบด้วยโปรแกรม Orcad Pspice และวัดค่า
สมบัติของระบบที่ในหัวข้อที่ออกแบบไว้เพื่อดูว่าสอดคล้องและยอมรับได้หรือไม่ โดยระบบที่นำมา
จำลองการทำงาน มีลักษณะดังนี้



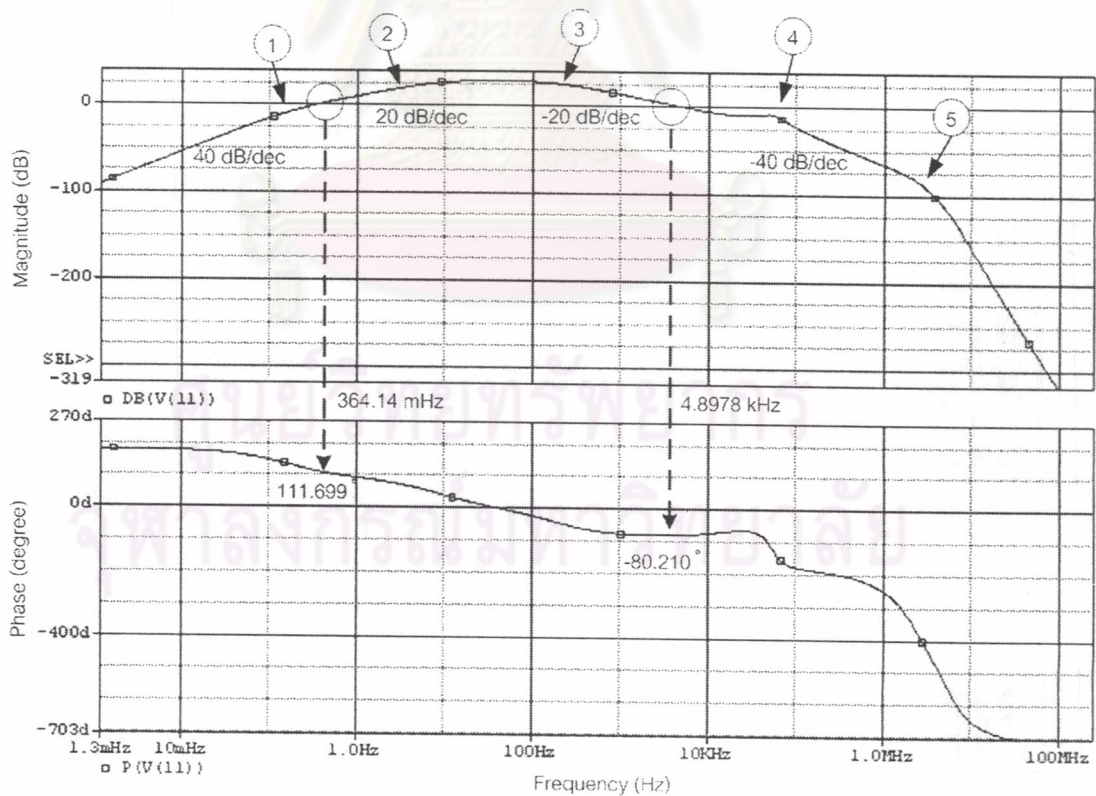
รูปที่ 4.16 วงจรขยายแรงดันที่ผ่านการชดเชยเสถียรภาพแล้ว

การทดสอบสมบัติของวงจรจะทดสอบในหัวข้อต่าง ๆ ต่อไปนี้

1. เสถียรภาพของวงจร

เราจะดูเสถียรภาพของวงจรโดยดูจากส่วนเผื่อของเฟสของระบบ ซึ่งสามารถหาได้จากกราฟผลตอบสนองทางความถี่ของระบบวงเปิดที่เปิดวงจรที่จุด x ในรูปที่ 4.16 ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 4.17 ซึ่งจะเห็นว่าที่ความถี่ต่ำ (ตำแหน่งหมายเลข 1 และหมายเลข 2) จะเป็นดังที่ได้อธิบายไว้แล้วในรูปที่ 4.11 ซึ่งระบบมีค่าส่วนเผื่อของเฟสเป็น 68.301 องศา ส่วนที่ความถี่สูง ระบบจะถูกชดเชยโดยการกำหนดขั้วและศูนย์เพิ่ม ทำให้ระบบมีส่วนเผื่อของเฟสเป็น 99.79 องศา ซึ่งจากค่าส่วนเผื่อความถี่ทั้งสองจะเห็นว่าระบบมีเสถียรภาพที่ดี

จากรูปที่ 4.17 การใส่ตัวเก็บประจุเพื่อชดเชยเสถียรภาพจะทำให้เกิดขั้วที่ความถี่ 183.15 Hz และศูนย์ที่ความถี่ 72.53 kHz ดังได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ ซึ่งขั้วจะมีผลในระบบวงเปิดในตำแหน่งหมายเลข 3 ในรูป ทำให้กราฟมีความชันเป็น -20 dB/decade จนมาถึงตำแหน่งหมายเลข 4 จะเห็นผลของขั้วสองขั้วที่เกิดจากค่าความจุแฝงระหว่างขดลวดในหม้อแปลงและค่าความเหนี่ยวนำสมมูลในหม้อแปลงซึ่งจะเห็นว่าผลของขั้วจากวงจรชดเชยจะเป็นตัวกำหนดส่วนเผื่อของเฟสก่อนที่จะเห็นผลจากค่าความจุแฝง ส่วนที่ตำแหน่งหมายเลข 5 ก็จะเป็นผลของขั้วอื่น ๆ ตามที่ได้กล่าวไว้แล้วก่อนหน้านี้



รูปที่ 4.17 ผลตอบสนองทางความถี่ของระบบวงเปิดของวงจรที่ชดเชยเสถียรภาพแล้ว

2. ความต่างเฟสของสัญญาณออกเทียบกับสัญญาณเข้า

จากผลการจำลองการทำงานของวงจร (ระบบวงปิด) จะพบว่าสัญญาณแรงดันออกจากวงจรจะมีเฟสตามสัญญาณแรงดันเข้าอยู่ 0.1048 องศา สำหรับกรณีที่มีโหลด R_L ส่วนกรณีไม่มีโหลดสัญญาณแรงดันออกจะตามสัญญาณเข้าอยู่ 0.0934 องศา ซึ่งน้อยกว่า 0.5 องศาตามที่ได้ออกแบบไว้

3. การคงค่าแรงดันของวงจร

การจำลองการคงค่าแรงดันทำโดยจำลองกรณีที่มีโหลดพิกัด R_L อยู่ในวงจรและกรณีไม่มีโหลด R_L อยู่ในวงจรเทียบกัน แล้วนำขนาดมาคำนวณตามสมการที่ 4.10 ปรากฏว่าได้ค่าการคงค่าแรงดันเป็น 0.09 % ซึ่งน้อยกว่าขอบเขตที่กำหนดคือ 0.1 % การที่การคงค่าแรงดันมีค่ามากกว่าที่คำนวณได้ในตอนต้นนั้นก็เนื่องมาจากการที่วงจรมี R_{eq} และการประมาณค่า r_o ของออปแอมป์นั่นเอง

4. ช่วงเวลาเข้าที่ของวงจร

เมื่อจำลองการทำงานในโดเมนของเวลาโดยใส่ขนาดค่ายอดของสัญญาณไซน์ด้านเข้าเป็น 5 V ปรากฏว่าที่สถานะคงตัว วงจรจะให้ขนาดสัญญาณออกที่มีขนาดค่ายอดเป็น 387.2 V ส่วนที่เวลา 0.2 วินาที ขนาดของสัญญาณออกจะเข้าที่ถึงค่า 385.13 V ซึ่งมากถึง 99 % ของค่าที่สถานะคงตัว (ซึ่งคิดเป็น 383.33 V) ดังนั้นระบบมีความเร็วในการตอบสนองสัญญาณเข้ามากพอผ่านขอบเขตที่กำหนด

5. อัตราขยายของวงจร

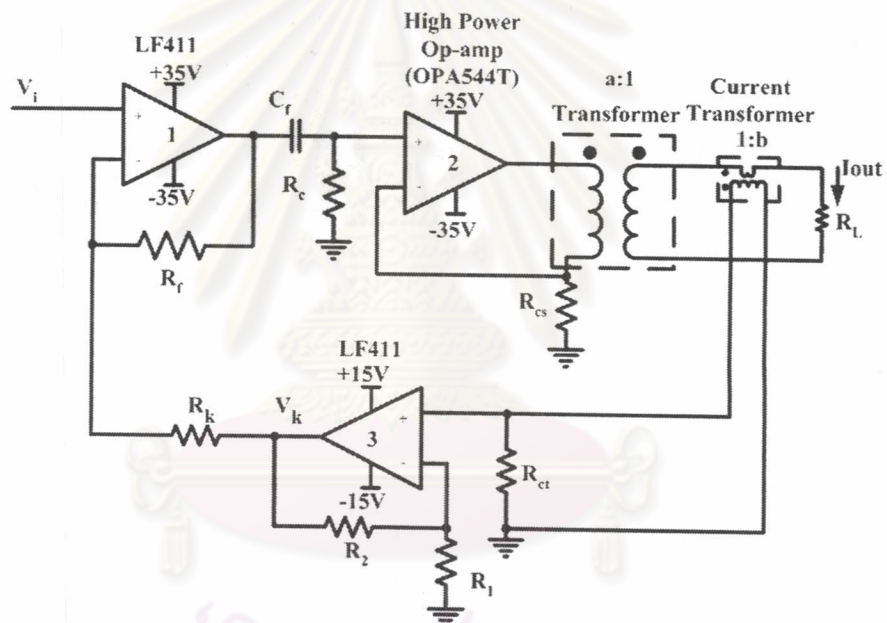
จากการจำลองการทำงานโดยหาผลตอบทางความถี่จะพบว่าวงจรมีอัตราขยายที่ความถี่ประมาณ 50 Hz เป็น 77.44 เท่า ซึ่งจะเห็นว่าไม่เท่ากับ 80 เท่าพอดีตามที่ได้ออกแบบไว้ ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากค่าอัตราขยายในวิธีก่อนหน้า (ค่า A ในรูปที่ 4.4) มีค่าไม่สูงพอ แต่ค่านี้ก็ยังสามารถรับได้เนื่องจากสามารถสร้างสัญญาณออกที่มีขนาดถึง $250 V_{rms}$ ได้ (สร้างได้ถึง $273.79 V_{rms}$) ต้องมีการปรับเทียบขนาดสัญญาณที่ส่วนสร้างสัญญาณต้นแบบอีกครั้ง

จะเห็นว่าค่าสมบัติต่าง ๆ ของวงจรที่ออกแบบจะมีค่าไม่ตรงกับค่าที่คำนวณกลับหลังออกแบบ ทั้งนี้ก็เพราะระบบที่ถูกจำลองการทำงานนั้นได้เพิ่มพารามิเตอร์เข้าไปจากวงจรต้นแบบที่ทำการวิเคราะห์เพื่อให้ผลการวิเคราะห์ใกล้เคียงความจริงมากขึ้น นอกจากนี้ในการออกแบบยังใช้การประมาณออปแอมป์ให้เป็นแบบอุดมคติทั้งหมดด้วย ดังนั้นพารามิเตอร์ดังกล่าวอาจจะส่งผลให้ผลการจำลองการทำงานที่ได้ไม่ตรงกับค่าที่คำนวณ

4.3 การออกแบบวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส

4.3.1 โครงสร้างของวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส

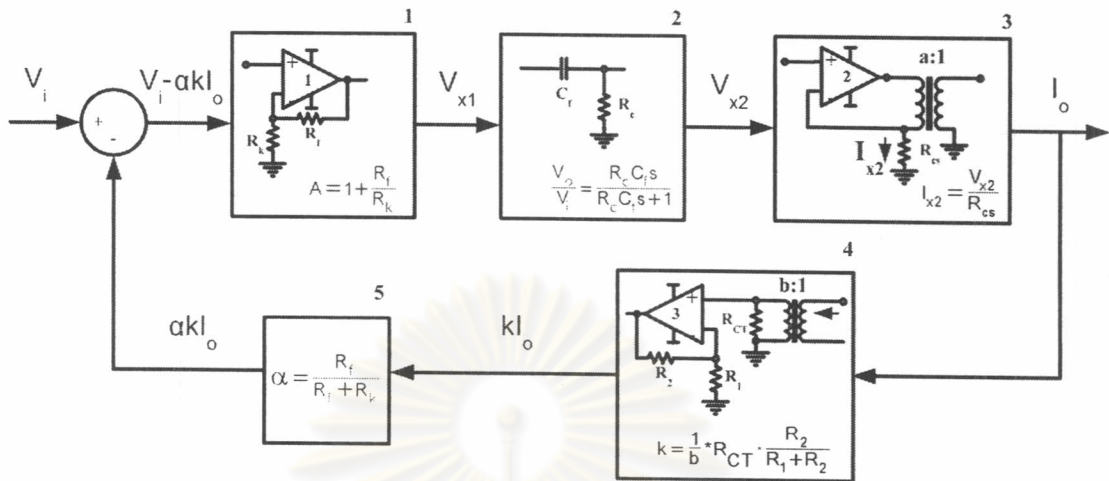
วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสรับแรงดันเข้าเป็นสัญญาณไซน์ที่มีค่ายอดสูงสุด 5 V ความถี่ 45-55 Hz วงจรจะแปลงสัญญาณแรงดันด้านเข้าให้เป็นกระแสและขยายสัญญาณกระแสนั้นเพื่อจ่ายเป็นสัญญาณกระแสทางด้านออกที่ขนาดไม่ต่ำกว่า $\pm 50 A_{rms}$ (อัตราขยายแรงดันเป็นกระแสประมาณ $10 A_{rms}/V_p$) การคงค่ากระแสด้านออกของวงจร (Current regulation) มีค่าไม่เกิน 0.1 % ที่โหลดของวงจรจ่ายกระแสด้านออกไม่เกิน $10 m\Omega$ (โหลดปกติ $5 m\Omega$) ความเพี้ยนของกระแสน้ำออกไม่เกิน 2 % วงจรมีเสถียรภาพที่ดี และมีช่วงเวลาเข้าที่ถึงค่า 1 % ของค่าที่สถานะอยู่ตัวไม่เกิน 0.2 s ส่วนความคลาดเคลื่อนของเฟสของสัญญาณกระแสด้านออกเมื่อเทียบกับสัญญาณแรงดันด้านเข้าต้องมีค่าไม่เกิน 0.5 องศา โครงสร้างของวงจรเป็นดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 โครงสร้างของวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส

หลักการออกแบบจะเหมือนกับวงจรขยายแรงดันนั่นคือวงจรประกอบไปด้วยวิธีไปหน้าและวิธีป้อนกลับโดยในวิธีไปหน้าจะประกอบด้วยส่วนกำหนดอัตราขยายของวิธีไปหน้า ส่วนกันสัญญาณออฟเซตและส่วนแปลงสัญญาณแรงดันเป็นกระแสและขับหม้อแปลง ส่วนในวิธีป้อนกลับจะประกอบไปด้วยตัวแปลงสัญญาณป้อนกลับจากสัญญาณกระแสเป็นสัญญาณแรงดันและวงจรปรับขนาดสัญญาณให้เหมาะสมเพื่อที่จะป้อนกลับต่อไป วงจรที่ออกแบบใช้ออปแอมป์ OPA544T ของบริษัทเทกซัส อินสตรูเมนต์ เช่นเดียวกับในวงจรแรงดันโดยในที่นี้ใช้เพียงตัวเดียว ทั้งนี้เนื่องจากในส่วนวงจรถูกกำหนดอัตราขยายของวิธีไปหน้านั้นไม่จำเป็นต้องทำงานที่ขนาดสัญญาณสูง ทำให้ในส่วนนี้และส่วนปรับขนาดสัญญาณป้อนกลับสามารถใช้ออปแอมป์กำลังต่ำ

เบอร์ LF411 ได้แทน เราสามารถแยกมองส่วนต่าง ๆ ในวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสได้ดังรูปที่ 4.19

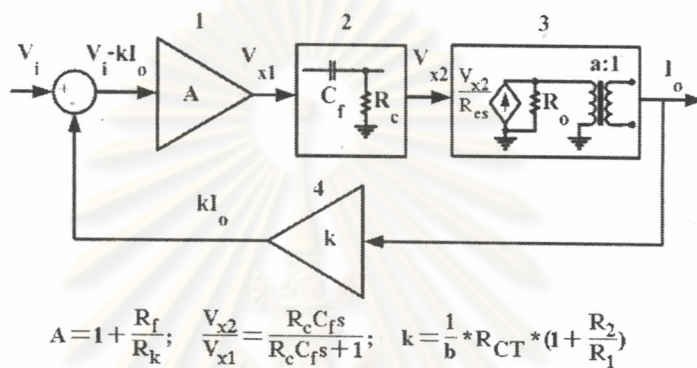


รูปที่ 4.19 โครงสร้างวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสมองแยกเป็นส่วนๆ

จากรูป วงจรออปแอมป์ในบล็อกหมายเลข 1 ทำหน้าที่กำหนดอัตราขยายในวิธีไปหน้าของวงจร โดยอัตราขยายสามารถหาได้จากพารามิเตอร์ในวงจร (R_f และ R_k) ออปแอมป์ที่ใช้คือ LF411 ซึ่งเป็นออปแอมป์กำลังต่ำซึ่งต่างจากของวงจรขยายแรงดันที่ใช้ออปแอมป์ที่สามารถจ่ายแรงดันได้สูงในส่วนนี้ ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากในส่วนของวงจรขับสัญญาณ (วงจรในบล็อกหมายเลข 3) นั้นไม่ต้องการขนาดสัญญาณเข้าที่สูงนั่นเองโดยรายละเอียดจะได้กล่าวในภายหลัง วงจรในบล็อกหมายเลข 2 ทำหน้าที่กันสัญญาณออฟเซตเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหาย สำหรับวงจรในบล็อกหมายเลข 3 เป็นวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสและขยายสัญญาณ ออปแอมป์ที่ใช้ในวงจรนี้เป็นออปแอมป์กำลังสูงเนื่องจากต้องจ่ายสัญญาณทั้งแรงดันและกระแสเพื่อขับหม้อแปลงโดยการต่อวงจรดังในรูปเป็นการต่อเพื่อให้ออปแอมป์แปลงสัญญาณแรงดันเป็นกระแสที่เป็นอัตราส่วนกับขนาดแรงดันด้านเข้าและขับผ่านหม้อแปลง หม้อแปลงกำลังทำหน้าที่ขยายขนาดสัญญาณกระแสและส่งผ่านโหลดของวงจรซึ่งเป็นสายไฟที่ทำหน้าที่เป็นทางผ่านของกระแสไปสู่มีเตอร์ที่ถูกทดสอบความแม่นยำและกลับมาที่วงจรจ่ายกระแส สำหรับอัตราขยายของการแปลงแรงดันเป็นกระแสจะขึ้นกับค่า R_{cs} ดังสมการในบล็อกที่ 3 กระแสที่ผ่านหม้อแปลงจะถูกขยายขนาด a เท่า (ตามอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลง) และส่งผ่านความต้านทานโหลด R_L ต่อไป ซึ่งสังเกตว่าอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงที่ใช้ในวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสนี้จะกลับกับอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงในวงจรขยายแรงดันเนื่องจากในที่นี้ต้องการขยายกระแสแทนแรงดันนั่นเอง วงจรในบล็อกที่ 4 ประกอบไปด้วยตัวแปลงสัญญาณป้อนกลับคือหม้อแปลงกระแส (Current transformer) ที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณกระแสด้านออกเป็นแรงดันเพื่อป้อนกลับ ขนาดสัญญาณที่ได้จะถูกกำหนดโดยอัตราส่วนจำนวนรอบ b และความต้าน

ทานโหลดที่นำมาต่อ R_{CT} สัญญาณแรงดันที่ได้จะถูกนำไปขยายอีกครั้งด้วยวงจรรอบแอมป์เพื่อให้มีขนาดเหมาะสมและยังเป็นการกันไม่ให้เกิดการผสมกระแสระหว่างวงจรถูกกำหนดอัตราขยายในวิถีไปหน้ากับวงจรถูกป้อนกลับอีกด้วย k ในรูปคืออัตราขยายของการป้อนกลับโดยมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างแรงดันป้อนกลับต่อสัญญาณกระแสด้านออกซึ่งมีขนาดเป็นดังในบล็อกที่ 4 ในรูป ส่วนบล็อกที่ 5 แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์ α ที่เกิดจากลักษณะการต่อวงจร

จากข้อมูลดังกล่าวมาข้างต้นทำให้สามารถเขียนวงจรในรูปแผนภาพบล็อกโดยประมาณค่า α เป็น 1 ได้ดังนี้



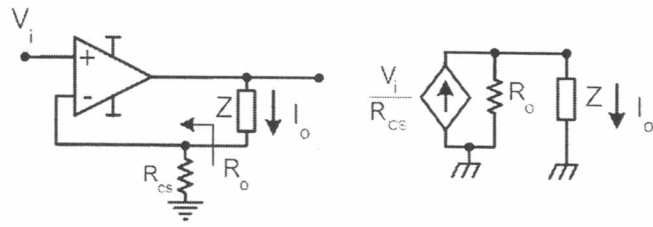
รูปที่ 4.20 แผนภาพบล็อกของวงจรแปลงสัญญาณแรงดันเป็นกระแส

เช่นเดียวกับวงจขยายแรงดันนั่นคือ บล็อกหมายเลข 1 และ 4 แทนด้วยอัตราขยายของวงจร สำหรับบล็อกหมายเลข 3 เนื่องจากวงจรรอบแอมป์ทำหน้าที่เป็นแหล่งกระแสจ่ายสัญญาณให้กับหม้อแปลงดังนั้นจึงแทนวงจรรอบแอมป์ด้วยแหล่งจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage control current source ;VCCS) ที่มีอัตราขยายแรงดันเป็นกระแสถูกกำหนดโดย R_{cs} ร่วมกับความต้านทานขาออกของแหล่งกระแส R_o รายละเอียดของวงจรนี้จะถูกกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

4.3.2 การวิเคราะห์และเลือกค่าพารามิเตอร์ของวงจร

ลักษณะสมบัติของวงจรที่ต้องการวิเคราะห์ คือ เสถียรภาพของวงจร ความต่างเฟสของสัญญาณด้านออกของวงจรเทียบกับสัญญาณด้านเข้า และการคงค่ากระแสของวงจร โดยทั้งหมดนี้สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้วงจรสมมูลของวงจร โดยในอันดับแรกจะขอกล่าวถึงวงจรขับกระแสที่ใช้ในวงจร (วงจรในบล็อกที่ 3 รูปที่ 4.19) ก่อนดังวงจรที่แสดงในรูปที่ 4.21

วงจรขับกระแสทำหน้าที่แปลงแรงดันขาเข้าของวงจรเป็นกระแสขาออกผ่านโหลด Z ของวงจร โดยจากรูป A_v คือ อัตราขยายวงเปิด (Open-loop gain) ของออปแอมป์ซึ่งมีค่าสูงมากทำให้สามารถประมาณอัตราการแปลงแรงดันเป็นกระแสและความต้านทานขาออกได้ดังรูปที่ 4.21 ซึ่งจะเห็นว่าวงจรมีลักษณะของแหล่งกระแสนั้นคือความต้านทานขาออกมีค่าสูงเนื่องจากมีอัตราขยายวงเปิดมากคูณด้วยนั่นเอง

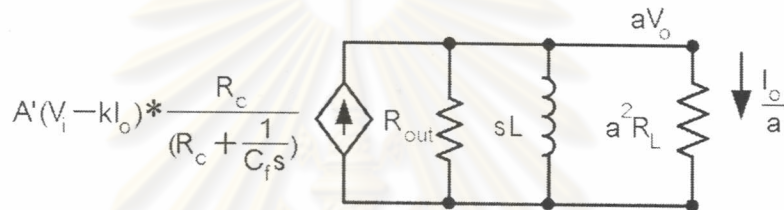


$$\frac{I_o}{V_i}(s) = \frac{A_v}{(Z + R_{cs}) + A_v R_{cs}} \approx \frac{1}{R_{cs}}$$

$$R_o = r_o + R_{cs}(1 + A_v) \approx A_v R_{cs}$$

รูปที่ 4.21 วงจรขับกระแสที่ใช้ในวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส

จากวงจรด้านซ้าย สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ดังวงจรด้านขวา และจะนำไปใช้เขียนวงจรสมมูลในบล็อกที่ 3 ในรูปที่ 4.19 ได้ดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 วงจรสมมูลของวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส

วงจรสมมูลในรูปเป็นวงจรที่มองที่ฝั่งซ้ายมือของหม้อแปลงเมื่อดูจากวงจรในบล็อกที่ 3 ในรูปที่ 4.20 อัตราขยายของแหล่งจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดันประกอบไปด้วยสามส่วน คือ อัตราขยายของวงจรออปแอมป์หมายเลข 1 อัตราขยายของวงจรกันออฟเซต และอัตราขยายของวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส โดยในรูปที่ 4.22 นั้น ค่า A' จะประกอบด้วย Av*Av1 เมื่อ Av หมายถึง อัตราขยายแรงดันของวงจรออปแอมป์หมายเลข 1 และ Av1 คืออัตราขยายของวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส Rout คือ ความต้านทานขาออกของวงจรออปแอมป์ที่ต่อเป็นแหล่งจ่ายกระแส สำหรับวงจรสมมูลของหม้อแปลงจะแทนด้วย L ซึ่งก็คือค่าความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กของหม้อแปลง ส่วนค่าพารามิเตอร์อื่นจะละเลยไป ค่า RL คือความต้านทานของสายไฟด้านออกของวงจรที่ถูกย้ายข้ามหม้อแปลงมาด้วยอัตราขยายกระแสเป็น a Vi คือ แรงดันด้านเข้าของวงจร ส่วน Vo และ Io เป็นค่าแรงดันและกระแสด้านออกของวงจรที่ถูกย้ายข้ามหม้อแปลงมาเช่นกัน

ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรในรูปที่ 4.22 เป็นดังนี้

$$\frac{I_o}{V_i}(s) = \frac{aAs^2}{\left(\frac{a^2 \cdot R_L}{R_{out}} + 1 + aAk\right)s^2 + \left(\frac{a^2 \cdot R_L}{R_{out} \cdot R_c \cdot C} + \frac{1}{R_c \cdot C} + \frac{a^2 \cdot R_L}{L}\right)s + \frac{a^2 R_L}{L \cdot R_c \cdot C}}$$

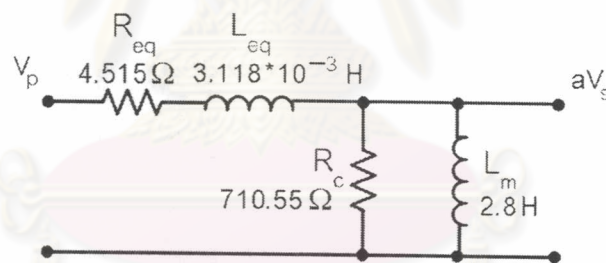
.....สมการที่ 4.17

สำหรับการออกแบบในขั้นต้นจะเลือกค่าพารามิเตอร์ให้วงจรโดยมีขั้นตอนดังนี้

1. เลือกค่าอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงขยายกระแส โดยพิจารณาจากการที่ออปแอมป์สามารถจ่ายแรงดันได้ในช่วง -30 V ถึง 30 V และจ่ายกระแสได้ถึง 2 A ดังนั้นจึงเลือกค่าอัตราส่วนจำนวนรอบของออปแอมป์เป็น $40:1$ นั่นคือค่า $a = 40$ เพราะจะทำให้ออปแอมป์จ่ายแรงดัน 14.14 V_p และกระแส $1.25\text{ A}_{\text{rms}}$ เพื่อสร้างกระแส 50 A_{rms} ที่โหลดของวงจรเป็น $5\text{ m}\Omega$ ซึ่งเป็นค่าที่ออปแอมป์สามารถจ่ายได้

2. เลือกค่าอัตราขยายป้อนกลับของวงจรจากขนาดสัญญาณกระแสขาออกสูงสุดของวงจรที่ต้องการคือ 50 A_{rms} โดยจะให้ป้อนกลับไปที่ห้กลางกับสัญญาณเข้าที่เป็นไซน์ขนาด $3.535\text{ V}_{\text{rms}}$ (5 V_p) เนื่องจากหม้อแปลงกระแสที่ใช้มีอัตราส่วนจำนวนรอบเป็น $2500:1$ ($b=2500$) และใช้ความต้านทานโหลด (R_{CT}) เป็น $50\ \Omega$ (สามารถวัดกระแสได้ในช่วง $0 - 70\text{ A}_{\text{rms}}$) ดังนั้นจากสมการของค่า k ในรูปที่ 4.20 จึงเลือกค่าอัตราขยายของวงจรออปแอมป์เป็น 3.5 เท่า ($R_1=25\text{ k}\Omega$, $R_2=10\text{ k}\Omega$) ซึ่งค่านี้จะทำให้วงจรวัดสัญญาณป้อนกลับวัดสัญญาณที่ 50 A_{rms} และป้อนกลับเป็นสัญญาณขนาดประมาณ $3.5\text{ V}_{\text{rms}}$ ซึ่งสามารถคำนวณค่า k ได้เป็น $0.07\text{ A}_{\text{rms}}/\text{V}_{\text{rms}}$

3. ค่าความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กของหม้อแปลงหาได้จากวงจรสมมูลของหม้อแปลงซึ่งหาโดยวิธีทดสอบเปิดวงจรและลัดวงจรได้ดังรูป



รูปที่ 4.23 วงจรสมมูลของหม้อแปลงขยายกระแส

วงจรสมมูลตามรูปเป็นวงจรสมมูลทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลง (ฝั่งวงจรออปแอมป์) ส่วนประกอบในวงจรเป็นดังที่ได้อธิบายไปแล้วในหัวข้อวงจรขยายแรงดัน ซึ่งจากรูปเราจะพบว่าค่าความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กมีค่าเป็น 2.8 H

4. ค่าความต้านทานในวงจรขั้วกระแส R_{cs} เลือกโดยจากค่ากระแสขาออกที่ต้องการคือ 50 A_{rms} จะต้องการกระแสขาเข้า $1.25\text{ A}_{\text{rms}}$ (ตามอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงขยายกระแส 40 เท่า) ค่ากระแสนี้จะต้องไหลผ่าน R_{cs} ด้วยดังนั้นจะเลือกค่า R_{cs} นี้ไม่ให้มีค่าสูงเกินไปเพื่อที่จะให้เกิดแรงดันตกคร่อมตัวมันเองมีค่าต่ำรวมไปถึงกำลังงานสูญเสียด้วย แต่จะเลือกค่าต่ำมากก็ไม่ได้ เพราะว่าค่าความต้านทานนี้เป็นตัวกำหนดอัตราขยายของวงจรขั้วแรงดัน (ดังแสดงในรูปที่ 4.21) ถ้าเลือกค่าต่ำมากอัตราขยายของการแปลงแรงดันเป็นกระแสจะมีค่าสูงทำให้ต้องใส่สัญญาณเข้า

ขนาดเล็กซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้สัญญาณออกมีความเพี้ยนได้เนื่องจากสัญญาณรบกวน ดังนั้นจึงเลือกค่า R_{cs} เป็น 1Ω

5. ค่าความต้านทานขาออกของวงจรขับกระแสหาจากผลคูณของอัตราขยายวงเปิดของออปแอมป์ A_v กับความต้านทานในวงจรขับกระแส R_{cs} ตามรูปที่ 4.21 โดยจากคู่มือของออปแอมป์ OPA544T จะพบว่าอัตราขยายวงเปิดของวงจรที่ความถี่ 50 Hz มีค่าประมาณ 90 เดซิเบล ซึ่งคิดเป็นจำนวนเท่าได้ 31622 เท่า ดังนั้นในการออกแบบจึงใช้ค่าความต้านทานขาออก R_{out} นี้เป็น 31.6 k Ω

6. ค่าความต้านทานโหลดของวงจร R_L เป็นความต้านทานของสายไฟที่เป็นทางผ่านของกระแสขาออก สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ค่าความต้านทานขาออกมีค่าได้ไม่เกิน 10 m Ω (สมภาวะปกติค่า R_L จะเป็น 5 m Ω)

เช่นเดียวกับวงจรแรงดัน เราจะเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหลือ ซึ่งก็คือความต้านทานกันออฟเซต R_c ตัวเก็บประจุกันออฟเซต C_f และอัตราขยายในวิธีไปหน้า A ด้วยข้อกำหนดของวงจรในหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้

1. เสถียรภาพของวงจร

เช่นเดียวกับวงจรขยายแรงดัน จากสมการที่ 4.17 เราจะมองสัมประสิทธิ์ของ s ในฟังก์ชันถ่ายโอนในรูปของตัวแปร A, B, C และ D ได้ดังนี้

$$\frac{I_o}{V_i}(s) = \frac{As^2}{Bs^2 + Cs + D} \dots\dots\dots \text{สมการที่ 4.18}$$

โดยที่

$$A = aA$$

$$B = \frac{a^2 \cdot R_L}{R_{out}} + 1 + aAk$$

$$C = \frac{a^2 \cdot R_L}{R_{out} \cdot R_c \cdot C} + \frac{1}{R_c \cdot C} + \frac{a^2 \cdot R_L}{L}$$

$$D = \frac{a^2 R_L}{L \cdot R_c \cdot C}$$

จากที่ได้กล่าวไว้แล้วในเรื่องวงจรขยายแรงดัน หัวข้อเสถียรภาพของวงจร เราจะใช้ข้อกำหนดเดียวกันสำหรับวงจรกระแสนั้นคือ $\zeta > 0.7$ ซึ่งทำให้ได้สมการที่ระบุขอบเขตของพารามิเตอร์เป็น

$$A < \left[\left(\frac{a^2 R_L}{R_{out} R_c C_f} + \frac{1}{R_c C_f} + \frac{a^2 R_L}{L} \right)^2 \cdot \frac{R_c C_f L}{a^2 R_L} \cdot \frac{1}{1.96} - 1 - \frac{a^2 R_L}{R_{out}} \right] \cdot \frac{1}{ak} \dots\dots \text{สมการที่ 4.19}$$

ซึ่งเมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ที่ได้กำหนดไว้จะได้เป็น (แทนค่า R_L เป็น 10 m Ω)

$$A < \left[\left(\frac{5.06 \cdot 10^{-4}}{R_c C_f} + \frac{1}{R_c C_f} + 5.714 \right)^2 \cdot \frac{R_c C_f}{5.714} \cdot \frac{1}{1.96} - 1 - 5.06 \cdot 10^{-4} \right] \cdot 0.357$$

.....อสมการที่ 4.20

2. ความต่างเฟสของสัญญาณออก

เช่นเดียวกับวงจรแรงดัน ความต่างเฟสของสัญญาณออกเทียบกับสัญญาณเข้าจะหาได้ดังสมการที่ 4.7 ซึ่งเมื่อจำกัดค่านี้ให้มีได้ไม่เกิน 0.5 องศา แล้วแทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ลงไปจะได้สมการกำหนดขอบเขตเป็น

$$A > \left[\left(\frac{a^2 R_L}{L} + \frac{a^2 R_L}{R_{out} R_c C_f} + \frac{1}{R_c C_f} \right) \cdot \frac{\omega}{8.727 \cdot 10^{-3}} + \frac{a^2 R_L}{R_c C_f L} - \left(\frac{a^2 R_L}{R_{out}} + 1 \right) \cdot \omega^2 \right] \cdot \frac{1}{a k \omega^2}$$

.....อสมการที่ 4.21

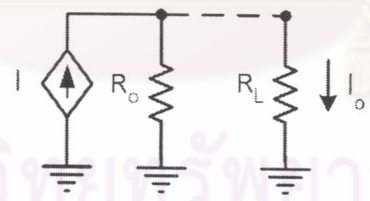
เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ที่ได้กำหนดค่าไว้แล้วโดยใช้ R_L เป็น $10 \text{ m}\Omega$ เนื่องจากที่โหลดค่านี้จะมีการเลื่อนเฟสที่สัญญาณออกมากที่สุด จะได้

$$A > \left[\left(5.714 + \frac{5.06 \cdot 10^{-4}}{R_c C_f} + \frac{1}{R_c C_f} \right) \cdot \frac{314159}{8.727 \cdot 10^{-3}} + \frac{5.714}{R_c C_f} - (5.06 \cdot 10^{-4} + 1) \cdot 314159^2 \right] \cdot 3.619 \cdot 10^{-6}$$

.....อสมการที่ 4.22

3. การคงค่ากระแส

การคงค่ากระแสคือความสามารถในการรักษาขนาดกระแสขาออกให้คงที่เมื่อโหลดของวงจรเปลี่ยนไปโดยบอกค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ สำหรับในวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสนี้เราจะหาการคงค่ากระแสโดยหาความต้านทานขาออกของวงจร ดังกรณีตัวอย่างดังนี้



รูปที่ 4.24 วงจรสมมูลเพื่อหาการคงค่ากระแส

วงจรตัวอย่างประกอบด้วยแหล่งกระแสที่จ่ายขนาดกระแสเป็น I และความต้านทานขาออก R_o เมื่อวงจรจ่ายกระแสให้โหลด R_L กระแสขาออก I_o ที่ได้จะมีค่าต่ำกว่าค่า I เนื่องจากมีกระแสส่วนหนึ่งไหลเข้าสู่ความต้านทานขาออกของวงจร เราสามารถหาการคงค่ากระแส (Current regulation ;CR) ของวงจรนี้ได้จากสมการ

$$CR(\%) = \frac{I_{nl} - I_{fl}}{I_{fl}} \cdot 100 \dots\dots\dots \text{สมการที่ 4.23}$$

จากสมการ I_{n1} คือ กระแสขาออกตอนไม่มีโหลด (ความต้านทานโหลดเป็นศูนย์) และ I_n คือ กระแสด้านออกตอนต่อโหลด R_L ในวงจรซึ่งจากรูปที่ 4.24 เราสามารถหาค่าการคงค่ากระแสของวงจรตัวอย่างได้เป็น

$$CR(\%) = \frac{R_L}{R_o} * 100 \dots\dots\dots \text{สมการที่ 4.24}$$

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 4.22 เราสามารถหาค่าความต้านทานขาออก R'_o ของวงจรเมื่อมองจากความต้านทานโหลดได้เป็น

$$R'_o = \frac{Z(1+aA'k)}{a^2} \dots\dots\dots \text{สมการที่ 4.25}$$

โดยที่ $A' = \frac{R_c C_f s}{R_c C_f s + 1} \cdot A$ Z คือ ขนาดอิมพีแดนซ์รวมระหว่างค่าตัวเหนี่ยวนำทำแม่เหล็ก L ของหม้อแปลงกับค่าความต้านทานขาออกของวงจรออปแอมป์ ซึ่งมีค่าเป็น $\frac{R_{out} sL}{R_{out} + sL}$ ดังนั้นเมื่อแทนค่าหาขนาดของ R'_o ด้วยการแทน $s = j\omega$ แล้วหาขนาดของค่าที่ได้ไม่เกิน 0.1 % จะได้ความสัมพันธ์

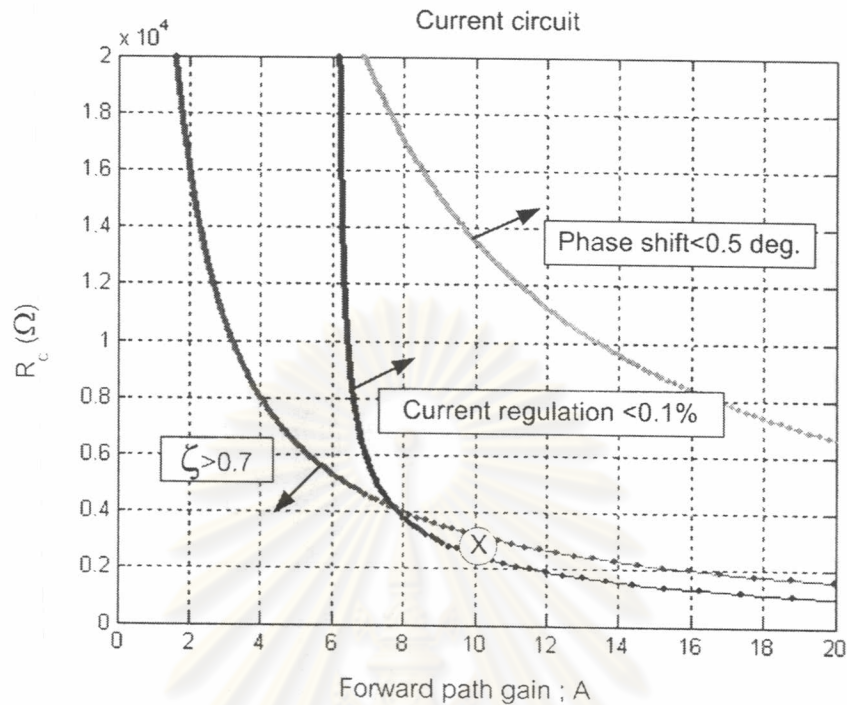
$$A > \left(\frac{1000 \cdot R_L a^2 \sqrt{(\omega L)^2 + R_{out}^2}}{\omega L R_{out}} - 1 \right) \cdot \frac{\sqrt{(R_c C_f \omega)^2 + 1}}{R_c C_f \omega} \cdot \frac{1}{ak} \dots\dots\dots \text{สมการที่ 4.26}$$

เมื่อคิดที่ความถี่ 50 Hz และค่า R_L เป็น 10 m Ω แล้วแทนค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ลงไปจะได้

$$A > (18.196 - 1) \cdot \frac{\sqrt{(R_c C_f 314.159)^2 + 1}}{R_c C_f 314.159} \cdot 0.357 \dots\dots\dots \text{สมการที่ 4.27}$$

จากสมการข้อกำหนดทั้งสาม (สมการที่ 4.20 , 4.22 และ 4.27) เราสามารถวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายวิธีไปหน้า A กับความต้านทานของวงจรรันออฟเซต R_c ได้ โดยที่แทนค่าตัวเก็บประจุกันออฟเซตเป็น 1 μF เพื่อให้วงจรรันออฟเซตไม่ลดทอนสัญญาณแรงดันมากเกินไป ผลที่ได้เป็นดังกราฟในรูปที่ 4.25 จากกราฟจะเห็นว่าเราไม่สามารถเลือกค่า R_c และ A ที่ทำให้ระบบมีสมบัติสอดคล้องกับข้อกำหนดทั้งสามได้ (รวมถึงในกราฟส่วนที่ไม่ได้แสดงอยู่ในรูปด้วย) ดังนั้นเราจะเป็นต้องเลือกตัดข้อกำหนดบางข้อออกไป ซึ่งในที่นี้จะเลือกตัดข้อกำหนดด้านความคลาดเคลื่อนเฟสด้วยเหตุผลที่ว่าเราสามารถปรับเทียบได้โดยใช้ส่วนสร้างสัญญาณต้นแบบ จากนั้นจึงเลือกค่าที่อยู่ในจุดที่สอดคล้องกับข้อกำหนดสองข้อที่เหลือโดยจุดที่เลือกคือ จุดที่ $A=10$ เท่า และ $R_c = 3k\Omega$ ซึ่งเมื่อแทนค่าพารามิเตอร์กลับจะพบว่า ค่าที่เลือกได้นี้ทำให้ระบบมีสมบัติคือ $\zeta=0.7216$, สัญญาณออกมีเฟสนำสัญญาณเข้าอยู่ 2.133 องศา และ การคงค่ากระแสมีค่าเป็น

0.0914 % (ขนาดอิมพีแดนซ์ขาออกเป็น 10.9383 Ω) ซึ่งผ่านข้อกำหนดที่ออกแบบไว้สองข้อตามที่ได้กล่าวไว้

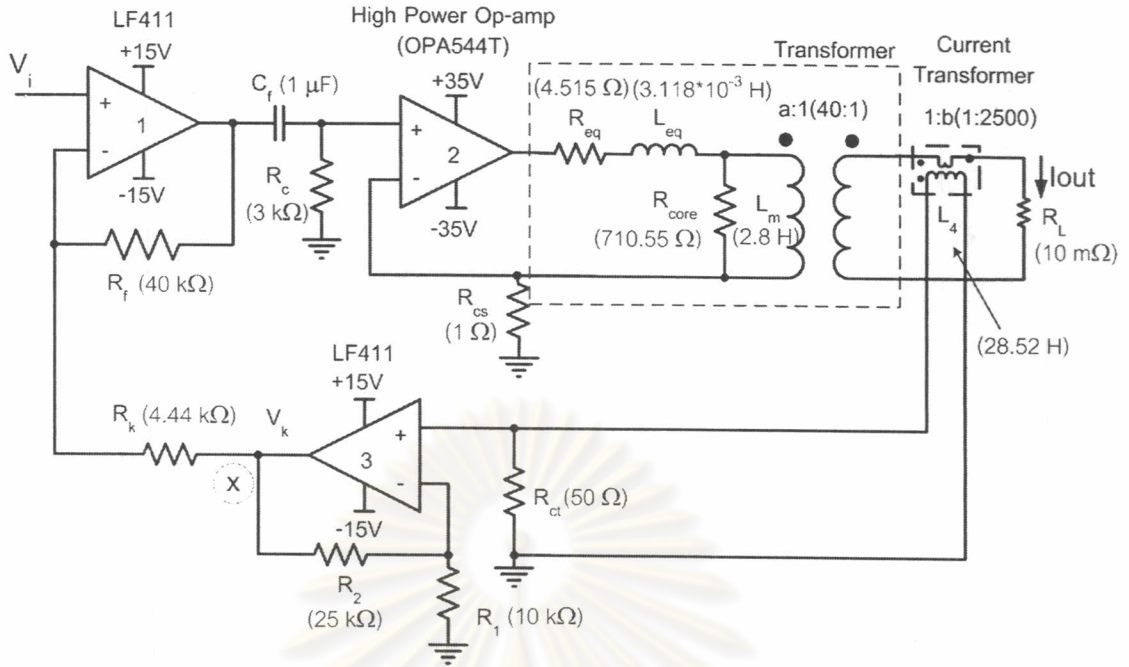


รูปที่ 4.25 การเลือกค่าพารามิเตอร์ A และ R_c ตามข้อกำหนดสำหรับวงจรมุมกระจายกระแส

4.3.3 การปรับปรุงวงจร

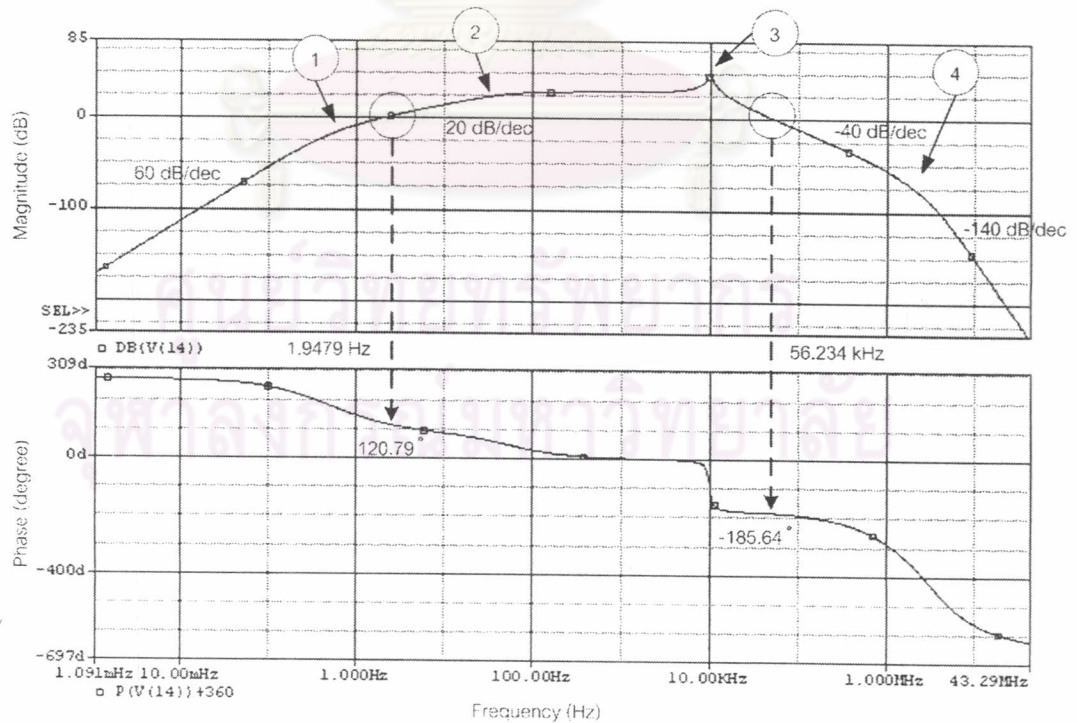
เมื่อวิเคราะห์ห้วงจรโดยแทนค่าพารามิเตอร์ทุกตัวลงไปในวงจรในรูปที่ 4.18 ใช้แบบจำลองวงจรของออปแอมป์เบอร์ OPA544T และ LF411 ที่บริษัทผู้ผลิตมีให้ รวมทั้งใช้วงจรสมมูลของหม้อแปลงที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.23 มาแทนที่ในตำแหน่งหม้อแปลงของวงจร (เดิมประมาณเป็นความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กตัวเดียว) สำหรับหม้อแปลงกระแสที่ใช้ นั้นจะแทนวงจรสมมูลด้วยความเหนี่ยวนำ L_4 ซึ่งได้ค่าจากการวัดค่าความเหนี่ยวนำทางฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลง (ฝั่งที่มีจำนวนรอบมาก) จะได้ว่าวงจรที่จะนำมาจำลองมีลักษณะดังรูปที่ 4.26

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



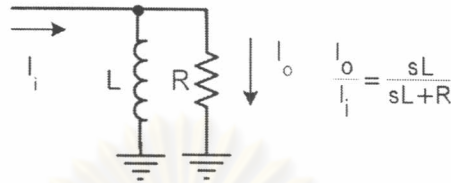
รูปที่ 4.26 วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสที่ออกแบบ

จากวงจรเราจะพิจารณาเสถียรภาพของวงจรโดยหาส่วนเผื่อของเฟสโดยหาจากผลตอบสนองทางความถี่ของระบบวงเปิดซึ่งทำโดยเปิดวงจรที่จุด x แล้ววัดความต้านทาน R_k ลงดิน จากนั้นวัดแรงดันทางด้านออกของวงจรออปแอมป์หมายเลข 3 ซึ่งเป็นสัญญาณป้อนกลับทั้งขนาดและเฟสได้ผลดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของระบบวงเปิดของวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส

จากรูปจะเห็นว่าอัตราขยายของสัญญาณที่ความถี่ต่ำ (ด้านซ้ายสุดของกราฟ) จะเพิ่มขึ้นด้วยความชันเป็น 60 dB/decade ซึ่งหมายถึงระบบนี้มีศูนย์ 3 ศูนย์ ซึ่งแตกต่างจากตอนที่ออกแบบไว้ จากวงจรสมมูลในรูปที่ 4.22 จะเห็นว่ามีส่วนศูนย์เพียง 2 ศูนย์ และมีขั้ว 2 ขั้ว ศูนย์และขั้วคู่แรกเป็นผลจากหม้อแปลงกำลังที่ทำหน้าที่ขยายกระแสซึ่งมีลักษณะอย่างง่ายดังแสดงในรูปที่ 4.28

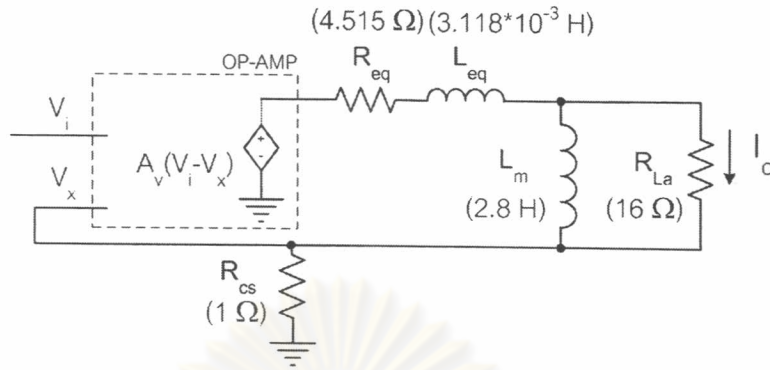


รูปที่ 4.28 วงจรสมมูลอย่างง่ายแสดงส่วนสร้างขั้วและศูนย์ของหม้อแปลงกระแส

จากรูป L แทนความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กของหม้อแปลง และ R แทนความต้านทานที่มาขนานกับ L ซึ่งจากวงจรในรูปที่ 4.26 จะหมายถึงความต้านทานแทนการสูญเสียในแกน R_{core} ขนานกับความต้านทานโหลด R_L (ถูกย้ายผ่านอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงมา) และขนานกับความต้านทานขาออกของแหล่งกระแส จากฟังก์ชันถ่ายโอนในรูปที่ 4.28 จะเห็นว่าหม้อแปลงขยายกระแสจะสร้างศูนย์ให้กับระบบวงเปิดที่จุดกำเนิดและสร้างขั้วอยู่ที่ความถี่ $\frac{R}{2\pi L}$ ทำให้เราสามารถประมาณค่าขั้วที่เป็นผลจากส่วนนี้ได้โดยการแทนค่าขนาดของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ได้ค่าเป็น 0.889 Hz ซึ่งหมายถึงตำแหน่งหมายเลข 1 ในรูปที่ 4.27 ศูนย์และขั้วอีกคู่หนึ่งจะเป็นผลมาจากวงจรถักออฟเซต (ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ด้านซ้ายมือ) ซึ่งมีศูนย์อยู่ที่จุดกำเนิด และขั้วอยู่ที่ความถี่ $\frac{1}{2\pi R_c C_f}$ ซึ่งแทนค่าได้เป็น 53.05 Hz ซึ่งหมายถึงตำแหน่งหมายเลข 2 ในรูปที่ 4.27 ส่วนศูนย์ที่เพิ่มเข้ามานั้นเป็นผลมาจากหม้อแปลงกระแสที่ทำให้หน้าที่วัดสัญญาณกระแสออกเพื่อป้อนกลับซึ่งเราได้ละเลยไปในตอนออกแบบวงจร ซึ่งวงจรหม้อแปลงกระแสจะมีลักษณะดังในรูปที่ 4.28 เช่นกัน ซึ่งจะเห็นว่าทำให้เกิดศูนย์ที่ความถี่ศูนย์และขั้วที่ความถี่ $\frac{R}{2\pi L}$ ซึ่งแทนค่าได้เป็น 0.279 Hz ซึ่งอยู่ที่ตำแหน่งหมายเลข 1 ของวงจร (ตำแหน่งหมายเลข 1 จะมีขั้วสองขั้วอยู่ติดกันทำให้ความชันของกราฟอัตราขยายวงเปิดเพิ่มขึ้น 40 dB/decade สำหรับในส่วนความถี่ต่ำนี้สามารถหาส่วนเผื่อของเฟสได้เป็น 59.21 องศาซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบมีเสถียรภาพ นั้นแสดงว่าการเพิ่มมาของขั้วและศูนย์ที่เกิดจากหม้อแปลงกระแสไม่ได้ทำให้ระบบขาดเสถียรภาพแต่อย่างใด ส่วนในด้านความถี่สูงสามารถหาส่วนเผื่อของเฟสได้เป็น -5.64 องศา ซึ่งแสดงให้เห็นชัดเจนว่าทำให้ระบบขาดเสถียรภาพดังนั้นจำเป็นต้องหาสาเหตุและทำการแก้ไข

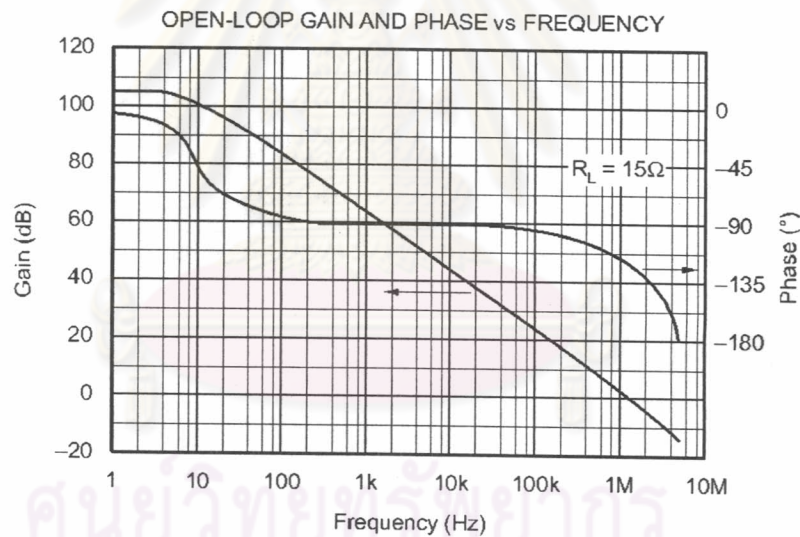
สาเหตุของการขาดเสถียรภาพเกิดจากโครงสร้างของวงจรออปแอมป์ที่ทำหน้าที่แปลงแรงดันเป็นกระแส (วงจรออปแอมป์หมายเลข 2 ในรูปที่ 4.26) เราจะยกวงจรมานี้มาพิจารณาแยกจาก

วงจรทั้งหมด โดยจะแทนออปแอมป์ด้วยแหล่งกำเนิดแรงดันควบคุมด้วยแรงดัน และละเลยความต้านทานขาออกของออปแอมป์ โหลดของวงจรคือ หม้อแปลงที่แทนด้วยวงจรสมมูลดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 โครงสร้างของวงจรออปแอมป์ที่ทำหน้าที่แปลงแรงดันเป็นกระแส

ความต้านทาน R_{La} คือความต้านทานด้านออกของหม้อแปลงที่ถูกย้ายมาทางฝั่งออปแอมป์ และจะละเลยความต้านทาน R_{core} ในรูปที่ 4.26 ไปเนื่องจากมีค่าสูงกว่าความต้านทาน R_L มาก ค่า A_v คืออัตราขยายวงเปิดของออปแอมป์ซึ่งลักษณะดังรูปที่ 4.30 (จากคู่มือของอุปกรณ์[10])



รูปที่ 4.30 อัตราขยายวงเปิดของออปแอมป์ OPA544T

ซึ่งจากรูปเราสามารถเขียนอัตราขยายวงเปิดของออปแอมป์ A_v ได้ในรูป

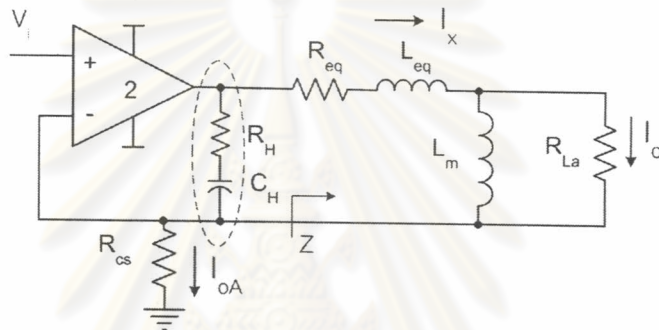
$$A_v = \frac{A_0}{\frac{s}{p} + 1} \dots\dots\dots \text{สมการที่ 4.28}$$

ซึ่งจากรูปที่ 4.30 เราสามารถหา A_0 ได้เป็น 105 เดซิเบล และความถี่หักมุม p ได้เป็น 10 Hz ซึ่งทำให้เราสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรในรูปที่ 4.29 ได้เป็น

$$\frac{I_o}{V_i} = \frac{3.1284 \cdot 10^7 s}{(s + 5.714)(s + 3493.72 + 59867.15 \cdot i)(s + 3493.72 - 59867.15 \cdot i)} \dots\dots\dots \text{สมการที่ 4.29}$$

จากฟังก์ชันถ่ายโอนจะเห็นว่าวงจรจะมี 1 ศูนย์และสามขั้ว โดยมีศูนย์อยู่ที่จุดกำเนิด และมีขั้วหนึ่งอยู่ที่ความถี่ต่ำซึ่งคิดเป็น 0.909 Hz ซึ่งขั้วและศูนย์คู่นี้จะเป็นขั้วและศูนย์ที่เกิดจาก R_L และ L_m หรือ (ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วก่อนหน้านี้) และอีกสองขั้วจะเป็นผลมาจากค่า L_{eq} ในวงจรสมมูลหม้อแปลงและขั้วของอัตราขยายวงเปิดของออปแอมป์ ซึ่งเมื่อคุณพจน์ทั้งสองเข้าด้วยกันจะมีลักษณะเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองเหมือนสมการที่ 4.3 โดยสามารถหาค่า ω_n ได้เป็น 9544.36 Hz และมี ζ เป็น 0.058 ซึ่งจะเห็นว่าต่ำมาก และมีผลทำให้เกิดลักษณะผลตอบของขนาดและเฟสดังตำแหน่งหมายเลข 3 ในรูปที่ 4.27

การแก้ไขเสถียรภาพของส่วนนี้ทำโดยใส่ค่าความต้านทานและค่าความจุเพื่อปรับขั้วของวงจดังรูปที่ 4.31

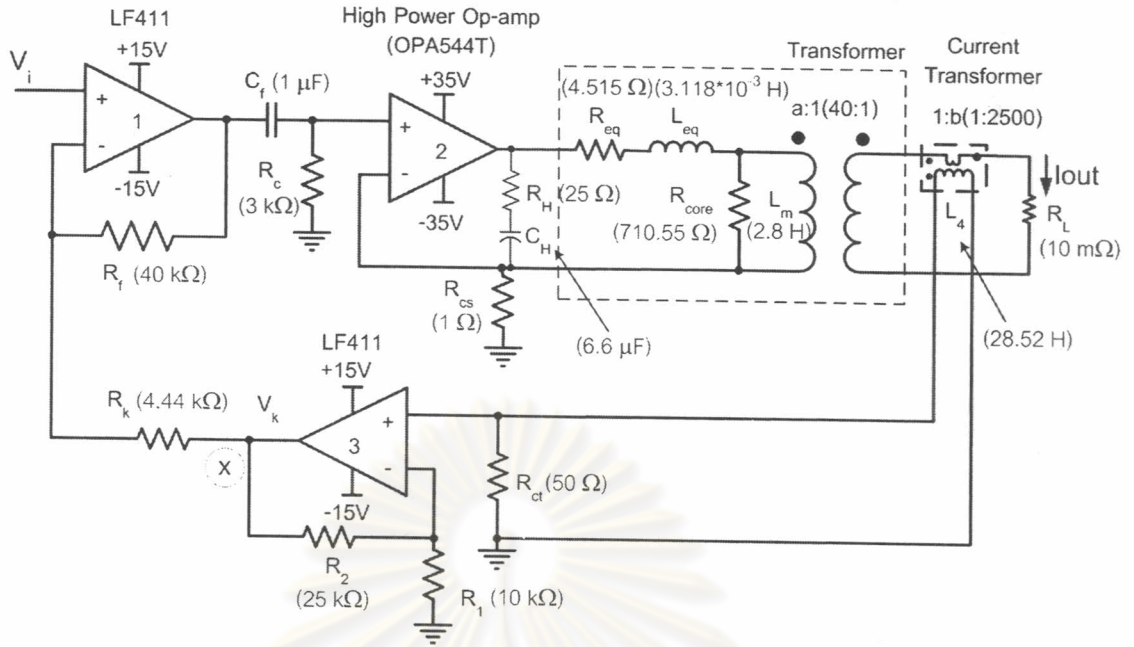


รูปที่ 4.31 การใส่ความต้านทานและตัวเก็บประจุเพื่อปรับขั้วของวงจร

การใส่ความต้านทาน R_H และ ค่าความจุ C_H เข้ามา จะเป็นการเพิ่มศูนย์ให้กับระบบ เมื่อให้ Z_H เป็นอิมพีแดนซ์รวมของ R_H และ C_H ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{R_H C_H s + 1}{C_H s}$ Z เป็นอิมพีแดนซ์รวมที่มองออกไปทางขวาของ Z_H และจากรูปที่ 4.21 เราทราบว่าสามารถประมาณค่ากระแส I_{oA} ว่ามีค่าประมาณ $\frac{V_i}{R_{cs}}$ ได้ เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง I_o และ V_i ได้เป็น

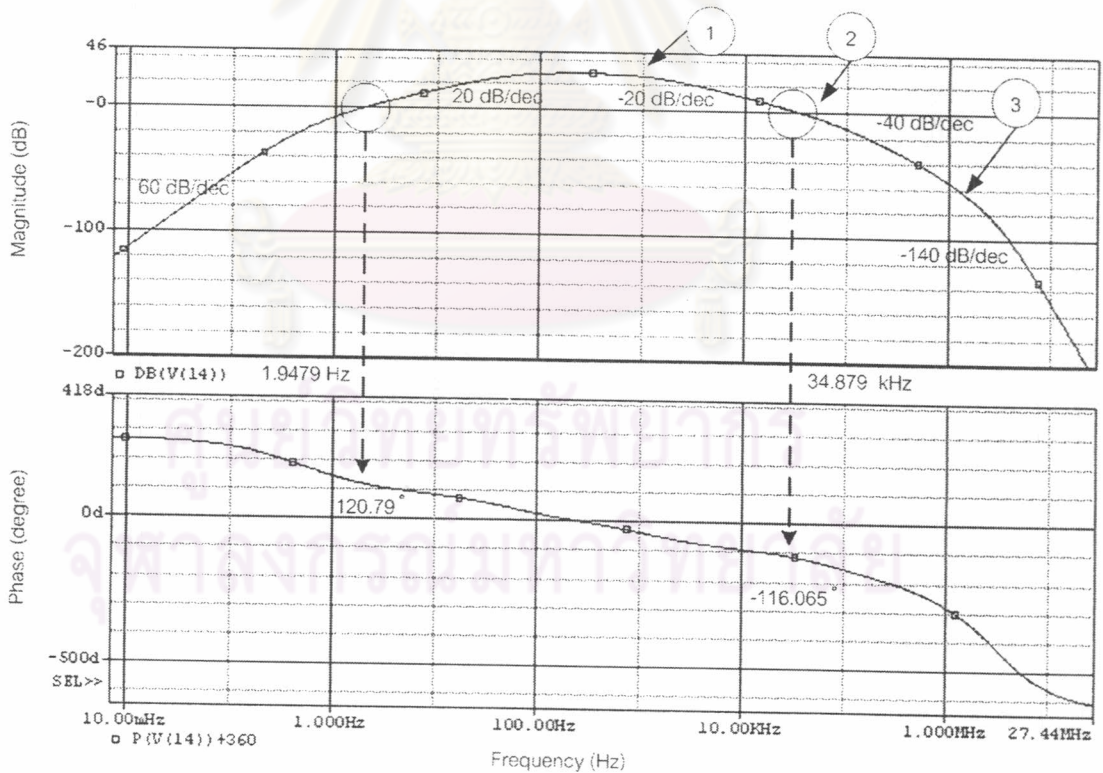
$$I_o = \frac{sL_m}{sL_m + R_{La}} \cdot \frac{Z_H}{Z_H + Z} \cdot \frac{V_i}{R_{cs}} \dots \dots \dots \text{สมการที่ 4.30}$$

จากสมการเราจะเห็นว่าศูนย์ของ Z_H จะกลายเป็นศูนย์ของระบบ ซึ่งในที่นี้เราจะใส่ศูนย์เข้าไปเพื่อชดเชยขั้วที่ทำให้วงจรขาดเสถียรภาพ จากการทดลองแทนค่าจะได้ว่าค่า R_H และ C_H ที่เหมาะสม และทำให้ระบบโดยรวมของวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสมีเสถียรภาพที่ความถี่สูงคือ $R_H = 25 \Omega$ และ $C_H = 6.6 \mu F$ โดยวงจรจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสที่ผ่านการแก้ไขเสถียรภาพแล้ว

จากวงจรเมื่อจำลองการทำงานของระบบวงเปิดจะได้ลักษณะผลตอบสนองเชิงความถี่เป็นดังรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของระบบที่แก้ไขเสถียรภาพแล้ว

ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าส่วนเนื้อของเพลที่ความถี่สูงมีค่าเป็น 63.935 องศา ส่วนที่ความถี่ต่ำ ส่วนเนื้อของเพลมีค่าเท่าเดิม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวงจรมีเสถียรภาพที่ดี จากนั้นจะทดลองจำลองการทำงานและวัดสมบัติต่าง ๆ ที่ออกแบบ ซึ่งได้ผลดังนี้

1. ความต่างเฟสของสัญญาณออกเทียบกับสัญญาณเข้า

จากผลการจำลองการทำงานของวงจร (ระบบวงปิด) จะพบว่าสัญญาณกระแสออกมีเฟสนำสัญญาณแรงดันเข้าอยู่ 1.8104 องศา ที่โหลด 10 mΩ จะเห็นว่าค่าความต่างเฟสที่วัดได้มากกว่าค่าที่กำหนดไว้ เนื่องจากในการออกแบบได้ตัดข้อกำหนดนี้ออกไปเพื่อให้ผ่านข้อกำหนดอื่น โดยจะไปชดเชยความต่างเฟสในภายหลังด้วยการปรับเทียบสัญญาณต้นแบบ

2. การคงค่ากระแสของวงจร

เนื่องจากการคงค่ากระแสต้องคิดเทียบกับกรณีไม่มีโหลดซึ่งสำหรับวงจรจ่ายกระแสจะหมายถึงความต้านทานของโหลดเป็นศูนย์ดังนั้นในการจำลองการทำงานจะไม่สามารถปรับให้ความต้านทานมีค่าเป็นศูนย์ได้ ดังนั้นจึงใช้ความต้านทานค่าต่ำมาก ๆ แทนโดยกำหนดให้ความต้านทานสำหรับกรณีไม่มีโหลดเป็น 0.01 mΩ และตอนมีโหลดสูงสุดเป็น 10 mΩ จากผลการจำลองการทำงานสามารถคำนวณการคงค่ากระแสได้เป็น 0.145 % (อัตราขยายที่โหลด 10 mΩ มีค่าเป็น 15.164 เท่า และอัตราขยายที่โหลด 0.01 mΩ มีค่าเป็น 15.186 เท่า) ซึ่งจะเห็นว่ามากกว่าค่าที่ออกแบบไว้ ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากการต่อ R_H และ C_H เข้ามาชดเชยเสถียรภาพนั่นเอง แต่สำหรับการใช้งานจริงแล้วพบว่าโหลดต่ำสุดของวงจรที่สามารถทำได้คือ 5 mΩ ดังนั้นถ้าคิดการคงค่ากระแสที่ความต้านทานโหลดจาก 5 mΩ ไปถึง 10 mΩ จะได้ค่าการคงค่ากระแสเป็น 0.0725 % (อัตราขยายที่โหลด 5 mΩ มีค่าเป็น 15.175 เท่า) จะเห็นว่ากระแสตกไปไม่เกิน 0.1 % ซึ่งยังยอมรับได้

นอกจากนี้จะเห็นว่าอัตราขยายของวงจรจะไม่เป็น 15 เท่าพอดีดังที่ได้กล่าวไว้ในช่วงแรก ซึ่งในส่วนนี้ก็สามารถแก้ไขได้ด้วยการปรับเทียบค่าสัญญาณต้นแบบเช่นเดียวกับวงจรรายแรงดัน

3. ช่วงเวลาเข้าที่ของวงจร

จากการจำลองการทำงานที่โหลดของวงจรถูกติ 5 mΩ พบว่าวงจรมีค่าช่วงเวลาเข้าที่ถึงค่า 1 % ของสัญญาณออกที่สภาวะอยู่ตัวเป็น 165 ms ซึ่งน้อยกว่า 0.2 s