

บทที่ 4

การประยุกต์ใช้งานวงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ ปรับค่าได้ด้วยแรงดัน

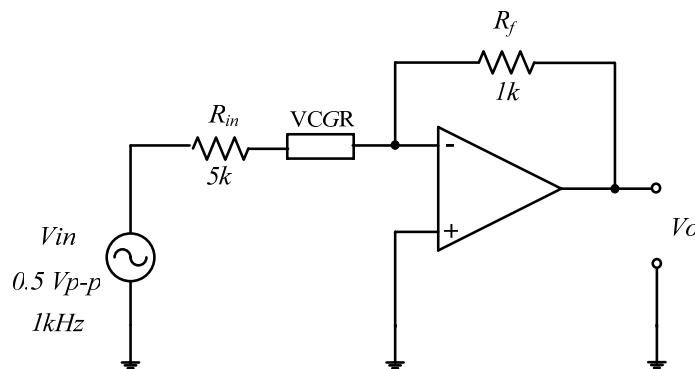
ในบทนี้จะกล่าวถึงการประยุกต์ใช้งาน วงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดันประกอบด้วย บทนำ วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส หลักการ และผลจำลองการทำงาน วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส หลักการและผลจำลองการทำงาน วงจรกรองความถี่สูงผ่านปรับค่าความถี่ได้ด้วยแรงดัน หลักการ และผลจำลองการทำงานและบทสรุป

4.1 บทนำ

ในการประมวลผลสัญญาณอนาล็อกทั่ว ๆ ไปนั้น เช่น วงจรขยายแรงดัน (Voltage Amplifier) และวงจรกรองสัญญาณแบบต่าง ๆ (Analog Filter) ซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลายชนิด กล่าวคือ ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ ขดลวดเหนี่ยวนำ ออปแอมป์ เป็นต้น มาประกอบรวมกันเป็นวงจรการประมวลผลสัญญาณอนาล็อกดังกล่าว ซึ่งในทางปฏิบัตินั้น ขดลวดเหนี่ยวนำจะเป็นอุปกรณ์ที่ถูกหลีกเลี่ยงมากที่สุดเพราะมีขนาดใหญ่ ไม่สามารถนำมาสร้างเป็นวงจรรวมได้ ด้วยเหตุนี้จึงมีการออกแบบตัวกรองความถี่ และวงจรขยายแรงดันโดยปราศจากขดลวดเหนี่ยวนำ โดยจะใช้ตัวเก็บประจุแทนหรือสังเคราะห์ขดลวดเหนี่ยวนำจากอุปกรณ์อื่นแทน เช่น ทรานซิสเตอร์ ตัวเก็บประจุ ออปแอมป์ เป็นต้น แต่หลักการดังกล่าวอาจจะยังไม่สามารถใช้งานได้กว้างขวาง เพราะไม่สามารถที่จะทำการปรับค่าได้ด้วยเหตุนี้งานวิจัยในบทนี้ได้มีการเสนอ การวิเคราะห์และออกแบบวงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดันโดยใช้ชิมอส ซึ่งจากงานวิจัยในบทที่ 3 มาทำประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรขยายสัญญาณ โดยแบ่งวงจรเป็น 2 วงจร คือ วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverting Circuit) และวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส (Non-Inverting Circuit) นอกจากนี้ วงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดันโดยใช้ชิมอส ยังสามารถที่จะประยุกต์ใช้เป็น วงจรกรองความถี่สูงผ่านปรับค่า ความถี่ได้ด้วยแรงดัน ซึ่งการประยุกต์ใช้งาน สำหรับวงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดันโดยใช้ชิมอส ในงานวิจัยนี้ สามารถที่จะนำไปประกอบเป็นวงจรประมวลผลสัญญาณอนาล็อกต่อไปได้

4.2 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส

วงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดันจากงานวิจัยนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้มากมาย ซึ่งในบทนี้จะนำวงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดันโดยใช้ซิมอส มาประกอบเป็นวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier) ซึ่งวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส ที่สัญญาณทางเข้าจะถูกเชื่อมต่อด้านต้านทาน R_{in} และความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดันไปยังขั้วต่อกลับเฟสสัญญาณของออปแอมป์ โดยที่สัญญาณทางออกจะถูกเชื่อมต่อด้านต้านทาน R_f กลับไปยังขั้วต่อกลับเฟสสัญญาณ ขั้วต่อไม่กลับเฟสสัญญาณของออปแอมป์จะถูกต่อลงดิน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส

การหาค่าสัญญาณแรงดันที่เอาต์พุต (V_o) ของวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส ในรูปที่ 4.1 สามารถหาค่าได้ตามสมการดังนี้

$$\text{จากรูปที่ 4.1} \quad \frac{V_{in}}{VCGR + R_{in}} + \frac{V_o}{R_f} = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{V_o}{V_{in}} = -\frac{R_f}{VCGR + R_{in}} \quad (4.2)$$

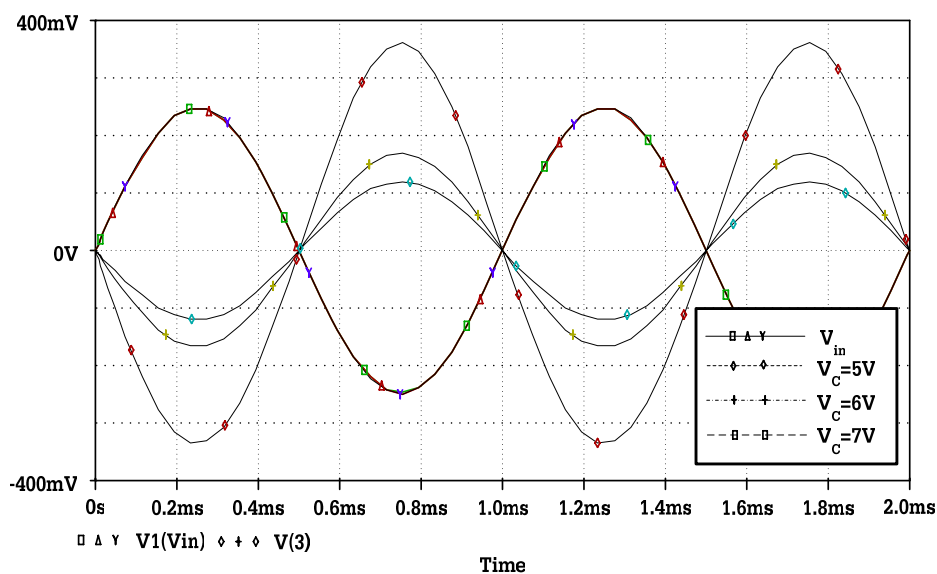
$$\text{ดังนั้น} \quad V_o = -\frac{R_f}{VCGR + R_{in}} V_{in} \quad (4.3)$$

4.2.1 ผลการจำลองการทำงาน

จากรูปที่ 4.1 เป็นวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส โดยจำลองการทำงานของวงจรด้วย ออปแอมป์ (Op-Amp) เบอร์ $\mu A741$ ซึ่งออปแอมป์เป็นอุปกรณ์ที่มีขั้วต่อทางเข้าสองขั้ว คือ ขั้วต่อ (+) และขั้วต่อ (-) หรือขั้วต่อไม่กลับขั้วสัญญาณ (Non-Inverting) และขั้วต่อกลับขั้วสัญญาณ (Inverting) อุปกรณ์ถูกต่อเข้ากับแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงด้วยสัญญาณ $(+V_{CC})$ และ $(-V_{CC})$ การอ้างอิงร่วม สำหรับค่าทางเข้า ค่าทางออก และแหล่งจ่ายกำลัง อยู่ทางด้านนอกของตัวออปแอมป์ เรียกว่ากราวด์ (Ground) และใช้ R_f แทนด้วยความต้านทานคงที่มีค่าเท่ากับ $1k\Omega$ เป็นตัวต้านทานป้อนกลับ ที่มีแหล่งจ่ายแรงดันอินพุตเป็นสัญญาณไซน์ที่มีขนาด $0.5V_{p-p}$ ที่ความถี่ $1kHz$ และ R_{in} ซึ่งแทนด้วยความต้านทานคงที่มีค่าเท่ากับ $5k\Omega$ ถูกต่อร่วมกับความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดัน (VCGR) การจำลองผลการทำงานโดยใช้โปรแกรม PSpice และใช้แบบจำลอง (Model) ของ T14Y MOSIS Level 3 ขนาด $0.25\mu m$ โดยมีค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ผลที่ได้จากการจำลองการทำงานของวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส เมื่อแทนค่า (VCGR) ด้วยวงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดัน แสดงดังรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์การจำลองผลการประยุกต์ใช้เป็นวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส

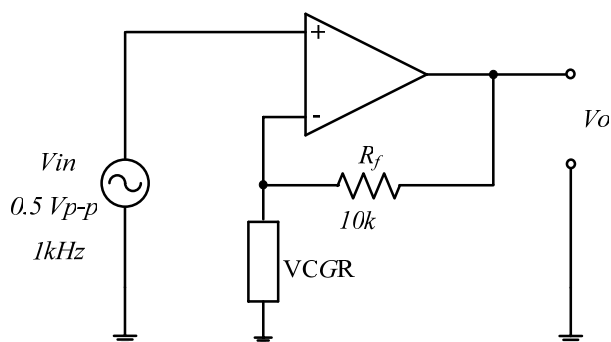
M_1	$10\mu m/10\mu m$
M_4, M_{10}	$3\mu m/1\mu m$
$M_2, M_3, M_5 - M_9, M_{11} - M_{17}$	$1\mu m/1\mu m$
V_{TN}	$0.42V$
V_{TP}	$-0.55V$
$\mu_N C_{OX}$	$250.1048 \mu A/V^2$
$\mu_P C_{OX}$	$51.94153 \mu A/V^2$
VoltageSource	$\pm 5V$
$V_{control} (V_C)$	$4V - 7V$
Op - Amp	$\mu A741$
R_{in}	$5k\Omega$
R_f	$1k\Omega$
V_{in}	$0.5V_{p-p}, 1kHz$



ภาพที่ 4.2 ผลการจำลองการทำงานของวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส

4.3 วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส

วงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดันจากงานวิจัยนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้มากมาย ซึ่งในบทนี้จะนำวงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดันมาประกอบได้เป็นวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส (Non-Inverting Amplifier) โดยที่สัญญาณที่ทางเข้าจะมาถึงขั้วต่อไม่กลับเฟสสัญญาณ ของตัวออปแอมป์ ขั้วต่อกลับเฟสสัญญาณจะถูกต่อเข้ากับขั้วสัญญาณทางออกผ่าน R_f และถูกต่อลงดินโดยผ่านความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดัน (VCGR) ดังแสดงในรูปที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส

การหาค่าสัญญาณแรงดันที่เอาต์พุต (V_o) ของวงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดันที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส จากรูปที่ 4.3 สามารถหาค่าได้ตามสมการดังนี้

จากรูปที่ 4.3
$$V_{in} = \frac{VCGR}{VCGR + R_f} V_o \quad (4.4)$$

$$V_o = \frac{VCGR + R_f}{VCGR} V_{in} \quad (4.5)$$

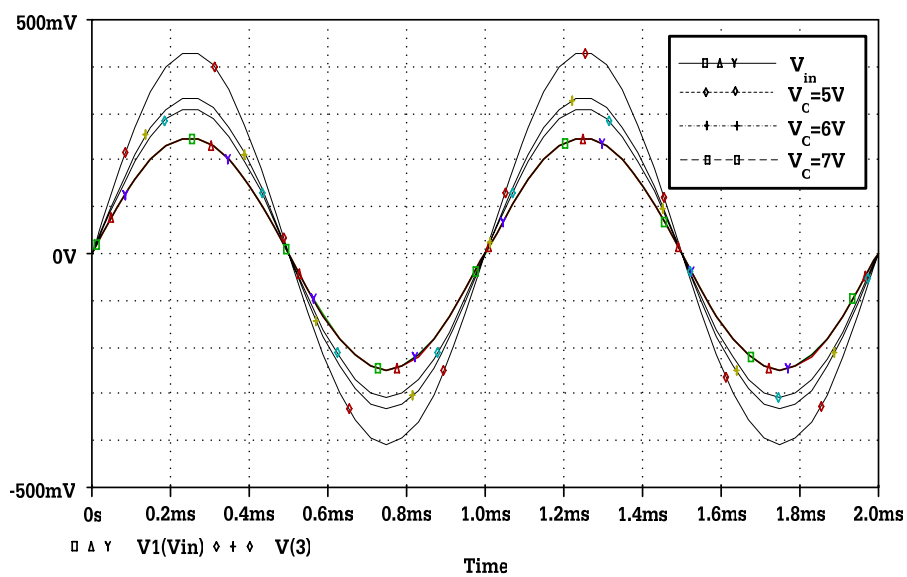
ดังนั้น
$$V_o = \left(1 + \frac{R_f}{VCGR}\right) V_{in} \quad (4.6)$$

4.3.1 ผลการจำลองการทำงาน

จากรูปที่ 4.3 เป็นวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟสโดยจำลองการทำงานของวงจรด้วยออปแอมป์ (Op-Amp) เบอร์ $\mu A741$ ซึ่งออปแอมป์เป็นอุปกรณ์ที่มีขั้วต่อทางเข้าสองขั้ว คือ ขั้วต่อ (+) และขั้วต่อ (-) หรือขั้วต่อไม่กลับขั้วสัญญาณ (Non-Inverting) และขั้วต่อกลับขั้วสัญญาณ (Inverting) อุปกรณ์ถูกต่อเข้ากับแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงด้วยสัญญาณ ($+V_{CC}$) และ ($-V_{CC}$) การอ้างอิงร่วม สำหรับค่าทางเข้า ค่าทางออก และแหล่งจ่ายกำลัง อยู่ทางด้านนอกของตัวออปแอมป์ เรียกว่ากราวด์ (Ground) และใช้ R_f ที่มีค่าความต้านทานคงที่มีค่าเท่ากับ $10k\Omega$ เป็นตัวต้านทานป้อนกลับสัญญาณ โดยมีแหล่งจ่ายแรงดันอินพุตเป็นสัญญาณไซน์ที่มีขนาด $0.5V_{p-p}$ ที่ความถี่ $1kHz$ และค่าของความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดัน (VCGR) การจำลองผลการทำงานโดยใช้โปรแกรม PSpice และใช้แบบจำลอง (Model) ของ T14Y MOSIS Level 3 ขนาด $0.25\mu m$ โดยมีค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ แสดงในตารางที่ 4.2 ผลที่ได้จากการจำลองการทำงานของวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส เมื่อแทนค่า (VCGR) ด้วยวงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดัน แสดงดังรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์การจำลองผลการประยุกต์ใช้เป็นวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส

M_1	$10\mu m/10\mu m$
M_4, M_{10}	$3\mu m/1\mu m$
$M_2, M_3, M_5 - M_9, M_{11} - M_{17}$	$1\mu m/1\mu m$
V_{TN}	$0.42V$
V_{TP}	$-0.55V$
$\mu_N C_{OX}$	$250.1048 \mu A/V^2$
$\mu_P C_{OX}$	$51.94153 \mu A/V^2$
VoltageSource	$\pm 5V$
$V_{control} (V_C)$	$4V - 7V$
Op – Amp	$\mu A741$
R_f	$10k\Omega$
V_{in}	$0.5V_{p-p}, 1kHz$



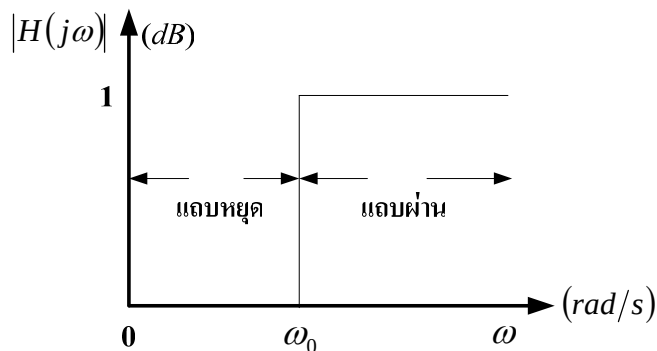
ภาพที่ 4.4 ผลการจำลองการทำงานของวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส

4.4 วงจรกรองความถี่สูงผ่านปรับค่าความถี่ได้ด้วยแรงดัน

วงจรกรองความถี่เป็นวงจรไฟฟ้าประเภทหนึ่ง ที่ตอบสนองต่อสัญญาณเข้ามาในลักษณะยอมเฉพาะสเปกตรัมของสัญญาณภายในช่วงที่กำหนดให้ผ่านวงจรไปได้ หรืออาจจะมีการขยายสัญญาณก่อนในกรณีวงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟ และกันสเปกตรัมของสัญญาณที่นอกเหนือจากภายในช่วงที่ได้กำหนดไม่ให้ผ่านวงจรกรองความถี่ไปได้โดยมีทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของวงจร $T(s)$ เป็นตัวกำหนดช่วงผ่านและช่วงหยุด ในช่วงผ่านมักเรียกช่วงนี้ว่า แถบผ่าน (Pass band) และในช่วงลดทอนมักเรียกในช่วงนี้ว่า แถบหยุด (Stop band)

ในทางอุดมคติ ช่วงแถบผ่านจะมีค่าของ $|T(s)| = 1$ ส่วนในช่วงของแถบหยุดจะมีค่าของ $|T(s)| = 0$ ด้วยรูปแบบของแถบผ่านและแถบหยุดนี้ จึงมีวงจรกรองความถี่พื้นฐานเกิดขึ้น 4 ชนิด คือ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน วงจรกรองความถี่สูงผ่าน วงจรกรองแถบความถี่ผ่านและวงจรกรองกั้นแถบความถี่ เป็นต้น ในการประยุกต์ใช้งานวงจรความถี่ตามแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดันที่นำเสนอในงานวิจัยบทนี้ จะนำเสนอเฉพาะในส่วนของการประยุกต์ใช้วงจรกรองความถี่สูงผ่านปรับค่าความถี่ได้ด้วยแรงดันเท่านั้น

วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter: HPF) จะตรงข้ามกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน นั่นคือ ช่วงความถี่จาก 0 ถึง ω_0 เรียกว่า แถบหยุด และช่วงความถี่จาก ω_0 ถึง ∞ เรียกว่า แถบผ่าน รูปของการตอบสนองทางขนาดเชิงความถี่ของวงจรในทางอุดมคติ แสดงดังรูปที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 การตอบสนองทางขนาดเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่สูงผ่านในทางอุดมคติ

วงจรกรองความถี่สูงผ่าน ที่ใช้ RC ดังรูปที่ 4.6 สัญญาณเอาต์พุตจะเป็นแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดัน สำหรับฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรคือ

$$H(\omega) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R}{R + 1/j\omega C} = \frac{j\omega_0 RC}{1 + j\omega_0 RC} \quad (4.7)$$

จากสมการที่ (4.7) จะเห็นได้ว่าถ้าความถี่ $\omega = 0$ จะทำให้ C ถูกลัดวงจรทำให้ฟังก์ชันถ่ายโอน $H(\infty) = 0$ และถ้าความถี่ $\omega = \infty$ จะทำให้ C ประพฤติตัวเสมือนวงจรเปิด ทำให้ฟังก์ชันถ่ายโอน $H(0) = 1$ และสัญญาณที่มีความถี่สูงกว่าความถี่ตัด ω_0 สามารถที่จะปรากฏด้านเอาต์พุตของวงจรได้ ส่วนสัญญาณที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่ตัด ω_0 จะถูกตัดเอาไว้ ที่ความถี่ตัด ω_0 จะทำให้เห็นขนาดของจริงจากสมการที่ (4.7) เท่ากับขนาดของส่วนจินตภาพ ทำให้ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอน $|H(\omega_0)|$ มีค่าได้ตามสมการ

$$|H(\omega_0)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega_0 RC}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1+1}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (4.8)$$

สำหรับความถี่ตัด ω_0 ของวงจรกรองความถี่สูงผ่านดังรูปที่ 4.6 จะมีค่าเป็น

$$R = X_C \quad (4.9)$$

$$R = \frac{1}{\omega_0 C} \quad (4.10)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{RC} \quad (4.11)$$

สำหรับความถี่ตัด f_0 ในหน่วย Hz จะเท่ากับ

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{RC} \quad (4.12)$$

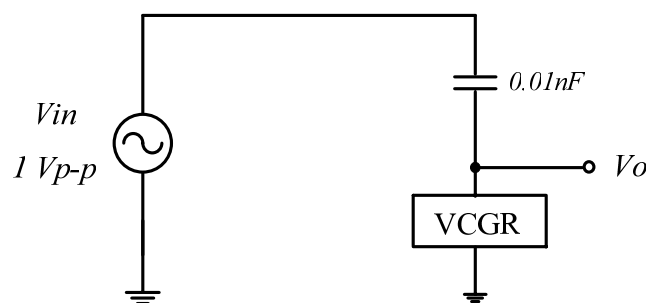
$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad (4.13)$$

4.4.1 ผลการจำลองการทำงาน

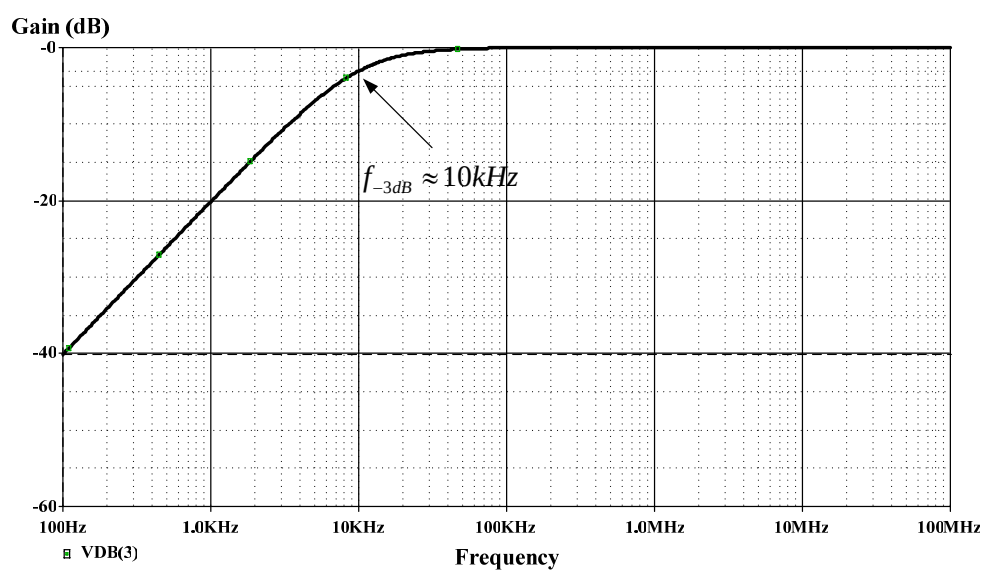
สำหรับการประยุกต์ใช้งาน วงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดันที่นำเสนอในงานวิจัยบทนี้ โดยทำการจำลองเป็นวงจรกรองความถี่สูงผ่านปรับค่าความถี่ได้ด้วยแรงดัน เพื่อดูช่วงความถี่ที่ใช้งาน ซึ่งทำการจำลองประกอบเป็นวงจรดังรูปที่ 4.6 กำหนดให้ V_{in} เป็นสัญญาณรูปไซน์ที่มีขนาด $1V_{p-p}$ และค่า $C = 0.01nF$ การจำลองผลการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice และใช้แบบจำลอง (Model) ของ T14Y MOSIS Level 3 ขนาด $0.25\mu m$ โดยมีค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ ๆ แสดงในตารางที่ 4.3 และของผลการจำลองของวงจรกรองความถี่สูงผ่านปรับค่าความถี่ได้ด้วยแรงดัน แสดงดังรูปที่ 4.7 ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนสามารถใช้งานได้เป็นอย่างดี

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์การจำลองผลการประยุกต์ใช้เป็นวงจรกรองความถี่สูงผ่านปรับค่าความถี่ได้ด้วยแรงดัน

M_1	$10\mu m/10\mu m$
M_4, M_{10}	$3\mu m/1\mu m$
$M_2, M_3, M_5 - M_9, M_{11} - M_{17}$	$1\mu m/1\mu m$
V_{TN}	$0.42V$
V_{TP}	$-0.55V$
$\mu_N C_{OX}$	$250.1048 \mu A/V^2$
$\mu_P C_{OX}$	$51.94153 \mu A/V^2$
VoltageSource	$\pm 5V$
$V_{control} (V_C)$	$4.5V - 7V$
C	$0.01nF$
V_{in}	$1V_{p-p}$



ภาพที่ 4.6 วงจรกรองความถี่สูงผ่านปรับค่าความถี่ได้ด้วยแรงดัน



ภาพที่ 4.7 ผลการจำลองการทำงานของวงจรกรองความถี่สูงผ่านปรับค่าความถี่ได้ด้วยแรงดัน

ค่าความถี่ตัดของวงจรกรองความถี่สูงผ่านปรับค่าความถี่ได้ด้วยแรงดัน โดยใช้ซิมอสมีค่าความถี่ตัดอยู่ประมาณ $f_{-3dB} \approx 10\text{kHz}$

4.5 บทสรุป

การวิเคราะห์และออกแบบวงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดัน โดยใช้ซีมอส (Voltage-Controlled Grounding Resistance Circuit: VCGR) ที่เสนอในงานวิจัยในบทนี้เป็นวงจรที่มีประโยชน์มากในวงจรรวม ด้านการประมวลสัญญาณทางอนาล็อก การประยุกต์ใช้งานมีกันอย่างกว้างขวางในหลายสาขาทั้งในด้านโทรคมนาคม หรืออิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ซึ่งในบทนี้ได้นำวงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดัน มาประยุกต์ในการใช้งานเป็น วงจรขยายสัญญาณ (Amplifier) อาทิเช่น วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier), วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส (Non-Inverting Amplifier) ตลอดจนยังนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรกรองความถี่สูงผ่านปรับค่าความถี่ได้ด้วยแรงดัน (High Pass Filter: HPF) ซึ่งในการประยุกต์ใช้งานทั้งหมดอาศัยการจำลองผลการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice และใช้แบบจำลอง (Model) ของ T14Y MOSIS Level 3 ขนาด $0.25\mu m$