โครงการวิจัยโดยใช้เงินรายได้คณะประจำปี 2550

อุปกรณ์วิเคราะห์ Loop Gain สำหรับวงจรจ่ายกำลังแบบสวิทช์ชิ่ง

Loop Gain Analyzer for Switching Power Supply

เสนอ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โดย

นายนนทวัฒน์ จุลเดชะ หัวหน้าโครงการ

น.ส. อนวัชวดี อมรธรรม ผู้ช่วยวิจัย

นาย อมรศักดิ์ โพธิธีรบุตร ผู้ช่วยวิจัย

ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	3
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	3
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 คุณสมบัติและรายละเอียดการทำงานของชิ้นงานในโครงการวิจัย	4
1.4 ระยะเวลาดำเนินงานโครงการวิจัย	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	6
2.1 การวิเคราะห์การตอบสนองต่อความถี่ (Frequency Response)	6
2.2 LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)	7
บทที่ 3 หลักการวิเคราะห์ และการออกแบบ	9
3.1 โครงสร้างของระบบทั้งหมด	9
3.2 การทำ Swept Sine Excitation และการ Sampling Signal	9
3.3 การออกแบบวงจร PWM Controller	16
3.4 วงจรจ่ายกำลังแบบสวิตช์ชิ่ง DC/DC ชนิด Buck	17
3.5 ส่วนออกแบบเครื่องมือวัดเสมือนในการวัดผลตอบสนองเชิงความถี่	19
บทที่ 4 ผลการทดลองโครงงาน	20
บทที่ 5 สรุปผลโครงงาน ปัญหาที่พบและแนวทางแก้ไข	23
กิตติกรรมประกาศ	25
เอกสารอ้างอิง	26

RCH
TK
7868
.S9
ม1542

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 84486
วัน,เดือน,ปี 13 ต.ค. 2551

b 11992815
i

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันวงจรจ่ายกำลังแบบสวิตช์ชิ่ง ได้ถูกนำไปใช้เพื่อจ่ายกำลังให้กับวงจรอิเล็กทรอนิกส์มากมาย เช่น คอมพิวเตอร์แบบ Note book, โทรทัศน์แบบจอแบน และวงจรจ่ายกำลังสำหรับเครื่องมือทางอุตสาหกรรมเป็นต้น ในเมืองไทยจึงมีผู้ผลิตวงจรจ่ายกำลังแบบสวิตช์ชิ่งหลายบริษัท เช่น Delta(Thailand) เป็นต้น บริษัทและมหาวิทยาลัยที่ทำการวิจัยเกี่ยวกับวงจรจ่ายกำลังแบบสวิตช์ชิ่งมีปัญหารวมกันคือ ในการออกแบบวงจรจ่ายกำลังแบบสวิตช์ชิ่งที่ต้องการให้วงจรทำงานได้ถูกต้อง และมีเสถียรภาพที่ดี วงจรต้องมี Controller ที่ดี การออกแบบ Controller โดยทั่วไปใช้หลักการ Frequency Analysis ด้วยเทคนิค Bode Plot ซึ่งเทคนิคนี้มีข้อจำกัดที่ผลการออกแบบเป็นการประมาณอย่างหยาบ เมื่อผลการออกแบบที่ได้ไปสร้างวงจรจริง จะได้วงจรกำลังแบบสวิตช์ชิ่งที่มีคุณภาพแตกต่างจากที่ออกแบบไว้ ผลการทดสอบที่ได้มักมีข้อผิดพลาด ดังนั้นนักวิจัยวงจรจ่ายกำลังแบบสวิตช์ชิ่งมีความต้องการอุปกรณ์ Loop Gain Analyzer เพื่อช่วยหาข้อมูลจากวงจรจริง เพื่อทำให้มีการปรับแต่งข้อมูลของ Controller ได้ถูกต้อง ซึ่งมีผลทำได้วงจรจ่ายกำลังแบบสวิตช์ชิ่งที่มีคุณสมบัติสูงขึ้น เช่นกันในห้องปฏิบัติควบคุมและแปลงรูปกำลังไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม มีงานวิจัยเกี่ยวกับวงจรจ่ายกำลังแบบสวิตช์ชิ่งระดับปริญญาตรีมากกว่า 8 เรื่องต่อปี ระดับปริญญาโทมากกว่า 4 เรื่องต่อปี และ ระดับปริญญาเอก 1 เรื่องต่อปี ก็มีความต้องการ Loop Gain Analyzer เช่นกัน ถึงแม้ว่ามีผู้ผลิต Loop Gain Analyzer อยู่บ้างแต่ราคาสูงมากทำให้มหาวิทยาลัยที่มีงบประมาณจำกัดไม่สามารถจัดซื้อได้ ผู้วิจัยจึงมีความประสงค์ที่จะทำการวิจัยเพื่อสร้าง Loop Gain Analyzer เพื่อใช้ในห้องปฏิบัติการของภาควิชาฯ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

พัฒนาและสร้าง อุปกรณ์วิเคราะห์ Loop Gain ของวงจรจ่ายกำลังแบบสวิทช์ชิ่ง โดยใช้เทคนิกแบบการวัดผลตอบสนองต่อความถี่ แล้วแสดงผลด้วย Bode Plot โดยโดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้โปรแกรม LabVIEW เป็นส่วนควบคุมการทำงานหลัก ซึ่งผู้ใช้สามารถนำผลไปออกแบบ Controller ต่อไป

1.3 คุณสมบัติและรายละเอียดการทำงานของชิ้นงานในโครงการวิจัย

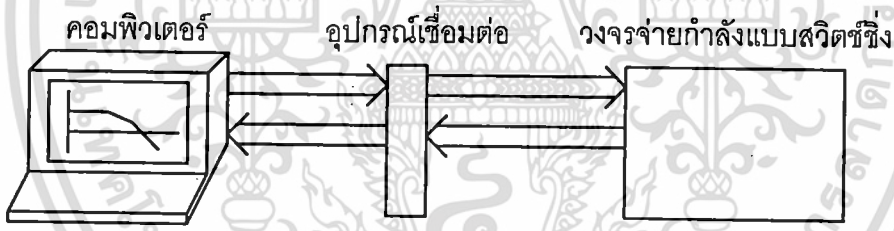
1.3.1 คุณสมบัติของ Loop Gain Analyzer ในงานวิจัย

1.3.1.1 สามารถวิเคราะห์ Open Loop Gain ของวงจรจ่ายกำลังแบบสวิตช์ชิ่งที่ทำงานได้ถึงความถี่ของการสวิตช์ 20 kHz

1.3.1.2 แสดงผลด้วย Bode Plot

1.3.2 รายละเอียดการทำงานของชิ้นงานในโครงการวิจัย

งานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรม LabView สร้างโปรแกรมเพื่อส่งสัญญาณทดสอบจากคอมพิวเตอร์ผ่านอุปกรณ์เชื่อมต่อไปยังวงจรจ่ายกำลังแบบสวิตช์ชิ่ง ที่ต้องการทดสอบ หลังจากนั้นก็วัดผลทดสอบที่ได้ส่งผ่านอุปกรณ์เชื่อมต่อกลับไปยังคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะนำข้อมูลที่ส่งออกและรับเข้ามาแสดงเป็น Bode Plot รูปที่ 1.1 แสดงการทำงานของ Loop Gain Analyzer



รูปที่ 1.1 ระบบของ Loop Gain Analyzer

โครงสร้างงานวิจัยที่ต้องทำ

1.3.2.1 โปรแกรมที่สร้างจาก LabView เพื่อควบคุมการทำงานทั้งหมดซึ่งประกอบด้วย

1.3.2.1.1 ส่วนควบคุมที่ส่งสัญญาณชนิดปรับความถี่ได้จาก 0 – 25 kHz

1.3.2.1.2 ส่วนรับสัญญาณชนิดกรองความถี่ที่สามารถควบคุม Bandwidth ได้

1.3.2.1.3 ส่วนคำนวณสัญญาณแบบ Digital

1.3.2.1.3 ส่วนแสดงกราฟ Bode Plot

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.2.2 อุปกรณ์เชื่อมต่อที่คุณสมบัติแยกกราวด์ระหว่างวงจรจ่ายกำลังแบบสวิตช์ชิ่งกับคอมพิวเตอร์

1.3.2.3 วงจรจ่ายกำลังแบบสวิตช์ชิ่ง DC/DC ชนิด Buck

1.4 ระยะเวลาดำเนินงานโครงการวิจัย 1 ปี

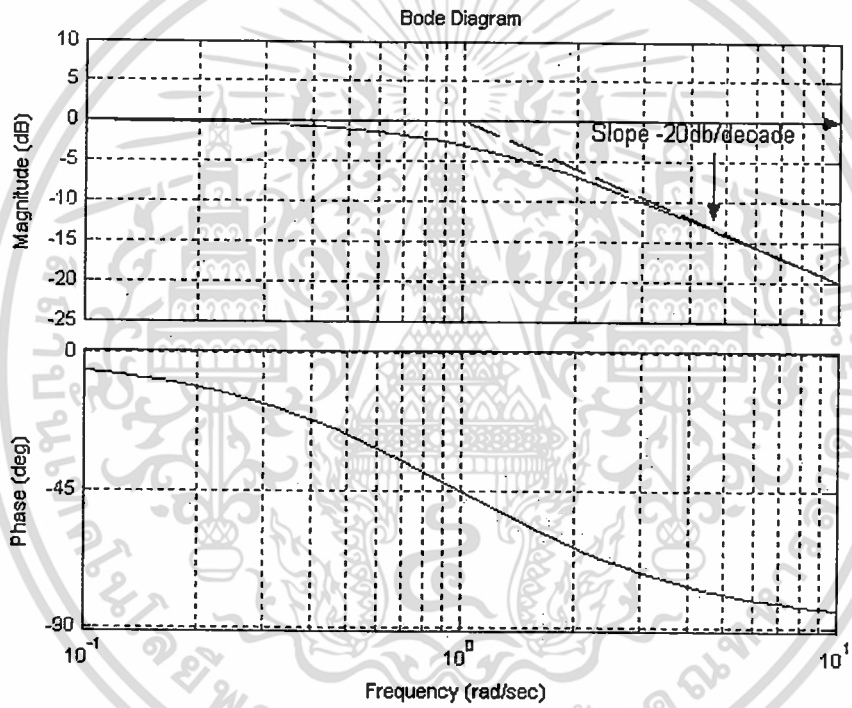
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 การวิเคราะห์การตอบสนองต่อความถี่ (Frequency Response)

ในการวิเคราะห์และออกแบบส่วนควบคุมของระบบควบคุมมีการวิเคราะห์ได้หลายรูปแบบ แต่วิธีการหนึ่งที่ได้รับความนิยมมากคือ การวิเคราะห์การตอบสนองต่อความถี่ของ Open – loop gain ของระบบ และแสดงผลด้วยเทคนิก Bode plot [1] รูปที่ 2.1 แสดง ตัวอย่าง Bode plot ของฟังชั่นถ่ายโอน $G(j\omega) = \frac{1}{1+j\omega T}$



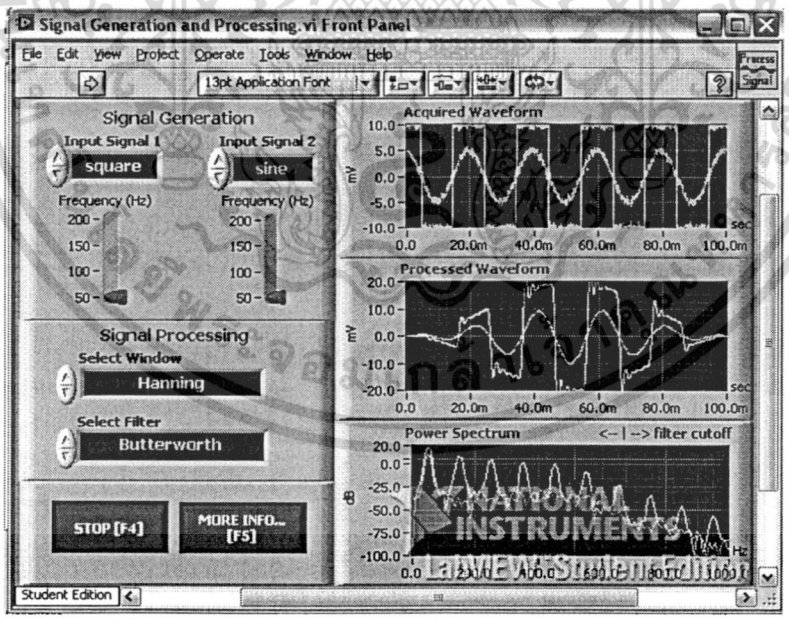
รูปที่ 2.1 Bode plot ฟังก์ชันถ่ายโอน $G(j\omega) = \frac{1}{1+j\omega T}$

งานวิจัยเรื่องนี้คือการใช้โปรแกรม LabVIEW ทำงานเป็นเครื่องมือวัดเสมือนตามลักษณะระบบตามรูปที่ 1.1 เพื่อให้ได้ กราฟ Bode plot นี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

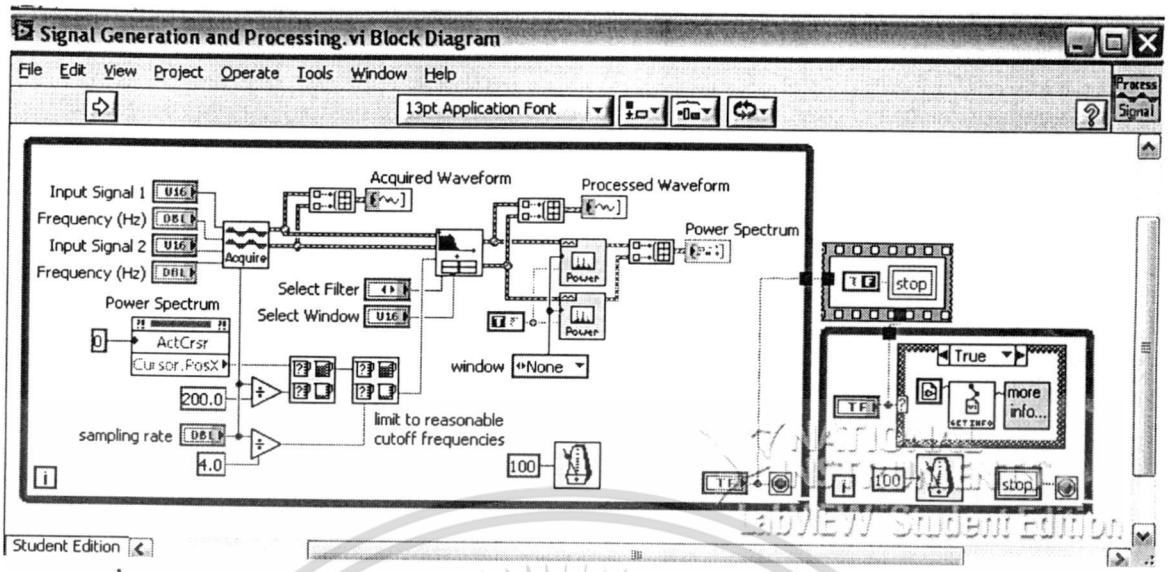
2.2 LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)

LabVIEW เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนา Application (โปรแกรมประยุกต์) ซึ่งเป็นการเขียนโปรแกรมโดยใช้รูป (Graphical-based Programming), LabVIEW ทำงานแบบ Dataflow, LabVIEW สามารถเขียนเป็นสมการต่างๆที่ซับซ้อนได้เหมือน Text-Based, การทำงานสามารถการติดต่อกับเครื่องมือภายนอก (Transducer) ที่ใช้วัดสัญญาณทางกายภาพต่างๆ และนอกจากนั้นสามารถนำประโยชน์จาก Computer Technology และNetwork Technology มาประยุกต์ใช้งาน ทำให้ในอุตสาหกรรมได้นำเอา LabVIEW มาประยุกต์ใช้งานมากขึ้น โดยเฉพาะงานทางด้านระบบควบคุม และออโตเมชั่น (Automation) โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นโดยใช้ LabVIEW จะเรียกว่า Virtual Instrument (VI) ซึ่งหมายถึงเครื่องมือวัดเสมือน LabVIEW ประกอบด้วยสองส่วนคือ Front Panel ซึ่งเปรียบเสมือนกับเครื่องมือวัดจริง สิ่งที่ผู้ใช้จะเห็นและควบคุมการทำงาน และส่วนที่เรียกว่า Block Diagram เปรียบเสมือนกับ Hardware ภายในเครื่องมือวัด ดังตัวอย่างแสดงอุปกรณ์ Signal Generation and Processing รูปที่ 2.2 แสดงส่วน Front Panel และรูปที่ 2.3 แสดงส่วน Block Diagram [2][3][4]

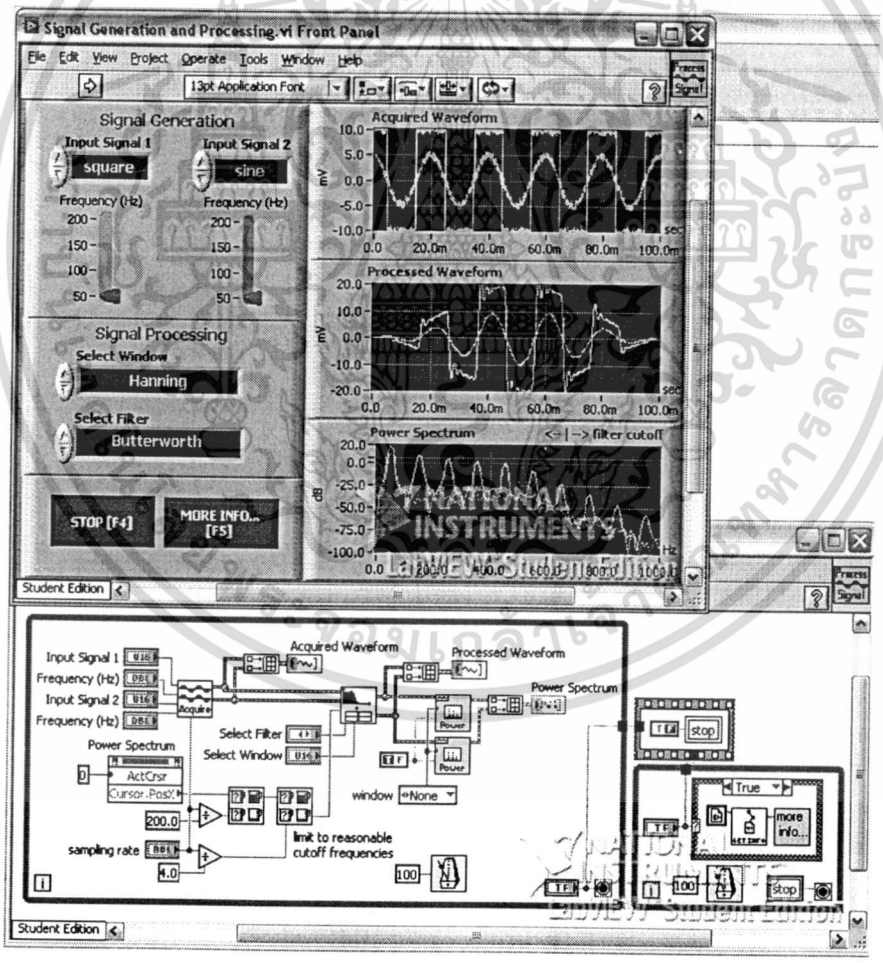


รูปที่ 2.2 ส่วน Front Panel ของ อุปกรณ์ Signal Generation and Processing

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ส่วน Block Diagram ของ อุปกรณ์ Signal Generation and Processing



รูปที่ 2.4 แสดงระบบทั้งหมดของอุปกรณ์ Signal Generation and Processing

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
หลักการวิเคราะห์ และการออกแบบ

3.1 โครงสร้างของระบบทั้งหมด

เครื่องมือวัดเสมือนเพื่อวัดผลตอบสนองเชิงความถี่ของระบบประกอบด้วยระบบย่อยๆคือ

3.1.1 Swept Sine Excitation และ **Sampling Signal** : LabVIEW ทำหน้าที่สร้างสัญญาณชนิด Sinusoidal ชนิดปรับความถี่ได้เพื่อนำไปเป็นสัญญาณชนิด Small signal ของ Duty cycle สำหรับ วงจรจ่ายกำลังแบบสวิตช์ชิ่ง DC/DC ชนิด Buck และในขณะเดียวกัน ทำหน้าที่รับสัญญาณ Small signal จากแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกของวงจรนี้เข้ามาวิเคราะห์ ซึ่งสัญญาณที่รับเข้ามาวิเคราะห์ เลือกรับเฉพาะ สัญญาณความถี่เดียวกับความถี่ของ Small signal ของ Duty cycle เท่านั้น

3.1.2 ระบบสร้าง Bode plot : LabVIEW ทำหน้าที่สร้างกราฟ Bode plot ของสัญญาณ Small signal ของ Duty cycle เปรียบเทียบกับ Small signal ของแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกจาก วงจรจ่ายกำลังแบบสวิตช์ชิ่ง DC/DC ชนิด Buck

3.2 การทำ Swept Sine Excitation และการ Sampling Signal

การใช้เทคนิค DSP (Digital Signal Processing) นั้น ต้องทำการแปลงสัญญาณ Analog ให้เป็นสัญญาณ Digital โดยพิจารณาสัญญาณ Analog ที่ถูก Sampling ทุก ๆ วินาที ส่วนการตั้งค่าสัญญาณให้ Sweepให้เหมาะสมมีหลักการที่ต้องคำนึงคือ การตั้งค่า Sampling Rate ไม่ให้เกิดการ Alias ของสัญญาณ ต้องทำการ Sample ที่ Sampling Frequency อย่างน้อยสองเท่าของความถี่ที่มากที่สุดของสัญญาณที่ต้องการ แต่ในทางปฏิบัติการ จะให้ Sampling Frequency ที่ 5-10 เท่าของความถี่สูงสุดที่ต้องการ

3.2.1 การสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกจำลอง

การสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกจำลองคือ การสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกจำลอง Analog Low pass Filter แบบ Chebyshev – I Filter เพื่อลดสัญญาณรบกวนจากภายนอกซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

f_p (passband frequency) = 10 kHz , f_s (stopband frequency) = 15 kHz

R_p (passband ripple) = 1 dB , A_s (stopband attennation) = 25 dB

f_p = 10 kHz $\Rightarrow$ $\Omega_p = 2\pi f_p$ = 62831.85307 rad/s

f_s = 15 kHz $\Rightarrow$ $\Omega_S = 2\pi f_s$ = 94247.77961 rad/s

ε (ripple parameter) = $\sqrt{10^{R_p/10}-1}$ = $\sqrt{10^{1/10}-1}$ = 0.5088

$$\Omega_c = \Omega_p = 62831.85307 \text{ rad/s}$$

$$A = 10^{A_s/20} = 10^{25/20} = 17.7828$$

$$\Omega_r = \frac{\Omega_S}{\Omega_p} = 1.5$$

$$g = \sqrt{\frac{(A^2-1)}{\varepsilon^2}} = 34.8952$$

$$\text{Order} = N = \frac{\left[\log_{10}\left(g+\sqrt{g^2-1}\right)\right]}{\left[\log_{10}\left(\Omega_r+\sqrt{\Omega_r{}^2-1}\right)\right]}$$

$$= \left[\frac{\log_{10}\left(34.895+\sqrt{34.895^2-1}\right)}{\log_{10}\left(1.5+\sqrt{1.5^2-1}\right)}\right]$$

$$= 5$$

Pole ที่เป็นไปได้ของวงจร Filter คือ

$$\alpha = \frac{1}{\varepsilon} + \sqrt{1+\frac{1}{\varepsilon^2}} = 4.1706$$

$$a = 0.5\left(\sqrt[N]{\alpha} - \sqrt[N]{1/\alpha}\right) = 0.2895$$

$$b = 0.5\left(\sqrt[N]{\alpha} + \sqrt[N]{1/\alpha}\right) = 1.0411$$

ดังนั้น Pole โพลที่เป็นไปได้ของวงจร Filter คือ

$$P_k = (a\Omega_c)\cos\left[\frac{\pi}{2} + \frac{(2k+1)\pi}{2N}\right] + j(b\Omega_c)\sin\left[\frac{\pi}{2} + \frac{(2k+1)\pi}{2N}\right]$$

(k = 0,1,2,3,4)

$$P_{0,4} = -5.6208\times10^3 \pm j\,6.2210\times10^4$$

$$P_2 = -1.8189\times10^4$$

$$P_{1,3} = -1.4716\times10^4 \pm j\,3.8448\times10^4$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H(S) = \frac{k}{\prod_{k=0}^{4}(S-P_k)}$$

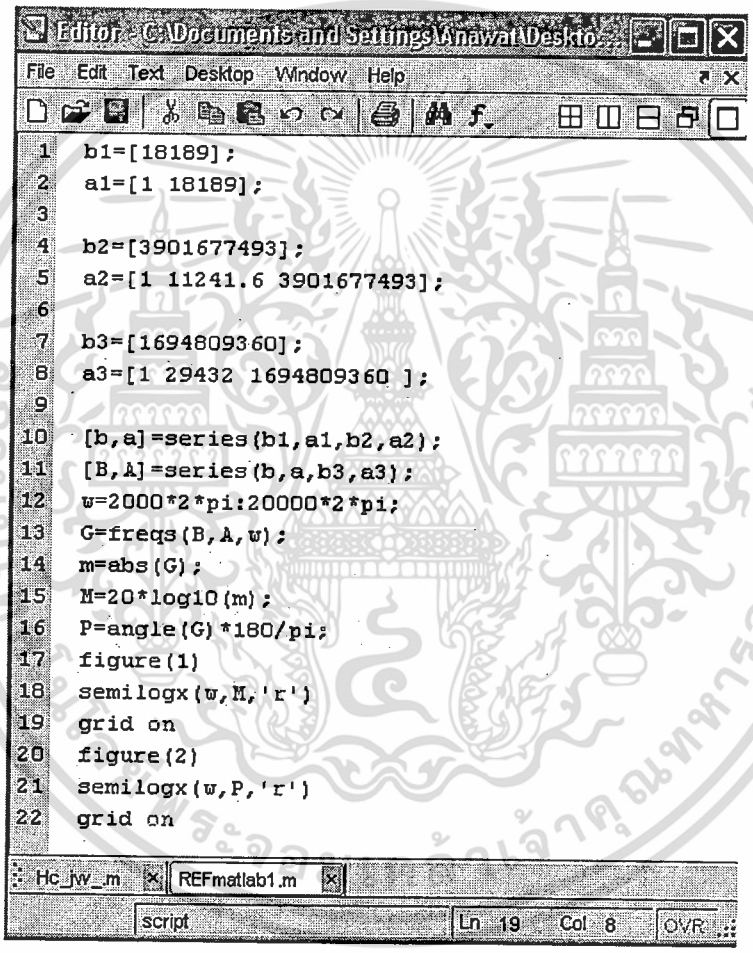
เมื่อ N เป็นจำนวนคี่ $H(j0) = 1$

$$K = 18189 \times 3901677493 \times 1694809360 = 1.202765729 \times 10^{23}$$

ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบคือ

$$H(s) = \frac{1.202765729 \times 10^{22}}{(S+18189)(S^2+11241.6S+3901677493)(S^2+29432S+1694809360)}$$

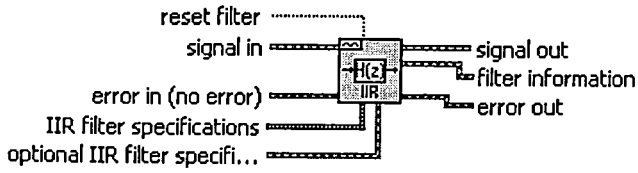
คำนวณหาผลตอบสนองความถี่ด้วยการใช้ MATLAB SIMULINK ได้ดังนี้



รูปที่ 3.1 แสดงการคำนวณด้วย MATLAB

ในส่วนของLabVIEW นั้น มีฟังก์ชัน Filter ให้เลือกโดยใช้ IIR (Infinite Impulse Response) Filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



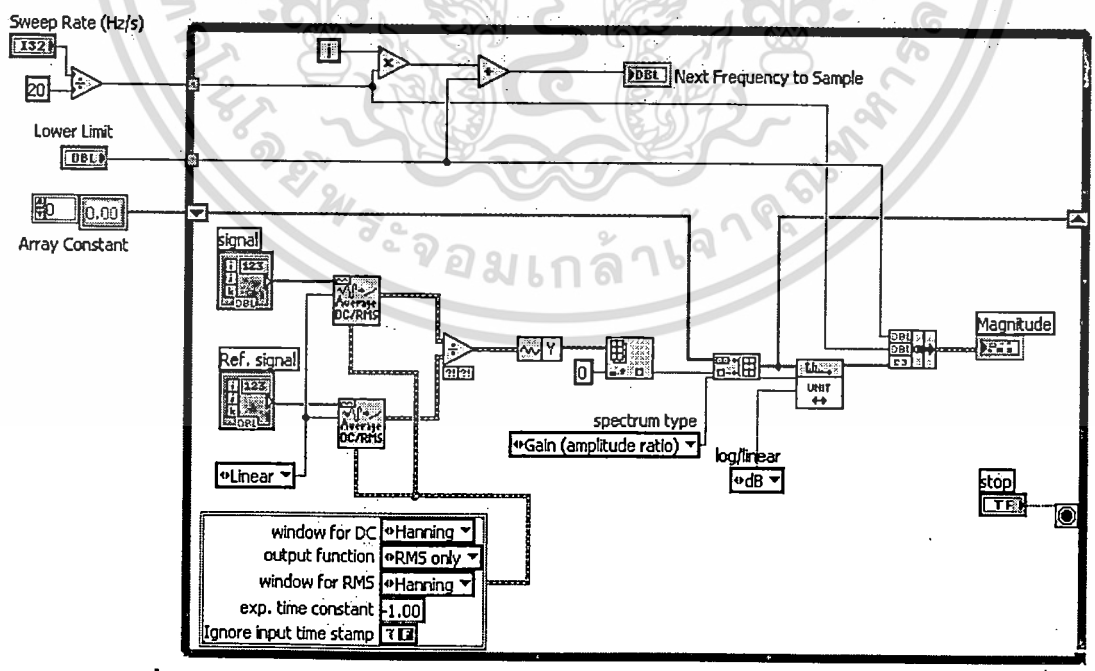
รูปที่ 3.2 IIR Digital Filter

3.2.2 การวิเคราะห์การตอบสนองเชิงความถี่โดย Bode Plots

การวิเคราะห์ตอบสนองเชิงความถี่โดย Bode plot คือ ป้อนสัญญาณ Sinusoidal ความถี่ ω ที่ปรับค่าได้ที่ทางเข้า แล้วนำสัญญาณด้านออกของระบบมาเปรียบเทียบกันทั้ง ขนาด และ เฟส ฟังก์ชันถ่ายโอน $H(j\omega)$ ของระบบเป็นอัตราส่วนของสัญญาณ ที่ทางออก $Y(\omega)$ กับ สัญญาณที่ทางเข้า $X(j\omega)$

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)}$$

- ขนาด $H|(\omega)|$ คืออัตราส่วนของขนาดแอมปลิจูดของสัญญาณที่ทางออกต่อสัญญาณที่ทางเข้า รูปที่ 3.3 แสดงโปรแกรม LabVIEW ที่ใช้คำนวณ $H|(\omega)|$

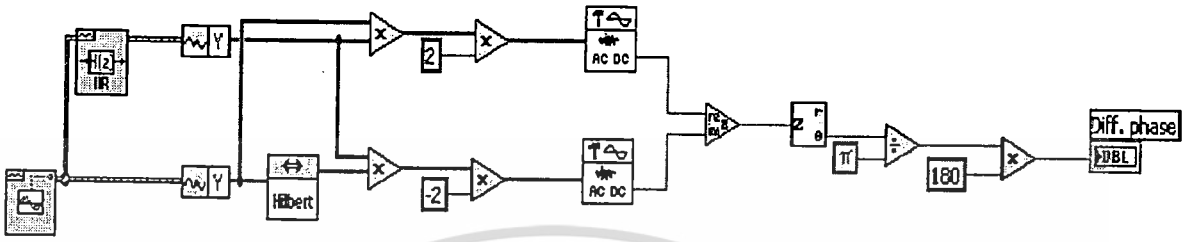


รูปที่ 3.3 การวิเคราะห์ขนาดและการใช้ Shift Register ในการเก็บค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มุมเฟส $\angle H(j\omega)$ คือ มุมเฟสเปรียบเทียบจากสัญญาณที่ทางออก กับสัญญาณที่ทางเข้า รูปที่ 3.4 แสดงโปรแกรม LabVIEW ที่ใช้คำนวณเฟส

$$\angle H(j\omega) = \tan^{-1} H(j\omega)$$



รูปที่ 3.4 แสดงการวิเคราะห์มุมเฟส

Reference signal = $\sin(at)$

Hilbert Transform of reference signal = $\cos(at)$

Measured signal = $\sin(at + \emptyset)$

จาก $\sin(A \pm B) = \sin(A)\cos(B) \pm \cos(A)\sin(B)$ –(1)

$\cos(A \pm B) = \cos(A)\cos(B) \mp \sin(A)\sin(B)$ –(2)

จากสมการที่ (1)

$\sin(A+B) - \sin(A-B) = \sin(A)\cos(B) + \cos(A)\sin(B) - \sin(A)\cos(B) + \cos(A)\sin(B)$

$\sin(A+B) - \sin(A-B) = 2\cos(A)\sin(B)$ –(3)

จากสมการที่ (2)

$\cos(A+B) - \cos(A-B) = \cos(A)\cos(B) - \sin(A)\sin(B) - \cos(A)\cos(B) - \sin(A)\sin(B)$

$\cos(A+B) - \cos(A-B) = -2\sin(A)\sin(B)$ –(4)

แทน A = at , B = $at + \emptyset$

จากสมการที่ (3)

$2\cos(at)\sin(at+\emptyset) = \sin(at + at + \emptyset) - \sin(at - at - \emptyset)$

$= \sin(2at + \emptyset) - \sin(-\emptyset)$

$2\cos(at)\sin(at+\emptyset) = \sin(\emptyset) + \sin(2at + \emptyset)$

จากสมการที่ (4) จะได้

$-2\sin(at)\sin(at+\emptyset) = \cos(at + at + \emptyset) - \cos(at - at - \emptyset)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= -\cos(\emptyset) + \cos(2at + \emptyset)$$

$$2\sin(at)\sin(at + \emptyset) = \cos(\emptyset) - \cos(2at + \emptyset)$$

ได้ $$2\cos(at)\sin(at + \emptyset) = \sin(\emptyset) + \sin(2at + \emptyset)$$

$$2\sin(at)\sin(at + \emptyset) = \cos(\emptyset) - \cos(2at + \emptyset)$$

$\cos(\emptyset)$ และ $\sin(\emptyset)$ คือ DC terms

$\cos(at + \emptyset)$ และ $\sin(at + \emptyset)$ คือ AC terms

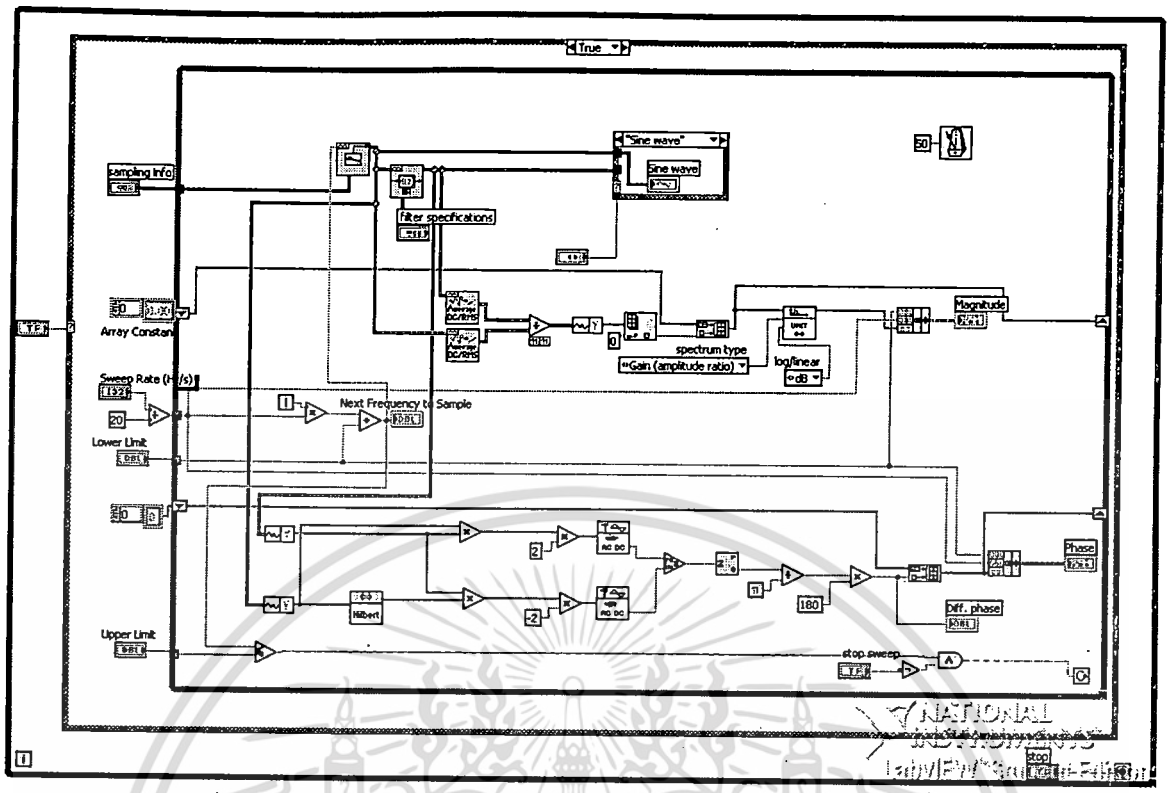
รวมกับเทอม DC $\cos(\emptyset) + j\sin(\emptyset)$ และเฟสคือ $\arctan\left[\frac{\sin(\emptyset)}{\cos(\emptyset)}\right]$

$$\angle H(j\omega) = \tan^{-1}\left[\frac{\sin(\emptyset)}{\cos(\emptyset)}\right]$$

- การบันทึกค่าขนาดและมุมเฟส

ในการปรับเปลี่ยนความถี่ Sinusoidal Swept ไปจนถึงความถี่ที่ตั้งไว้ จึงต้องมีการเก็บค่าผลตอบสนองในแต่ละความถี่ โดยการใช้ Shift Register ใน While Loop ในการเก็บค่า กล่าวคือการเก็บค่าในแต่ละครั้งจะมีค่าตั้งแต่ค่าเริ่มต้น จนถึงค่าสุดท้ายของ While Loop ซึ่งในที่นี้ที่ด้านซ้ายมือของ Shift Register จะมีตัวแปรซึ่งเรียกว่า Initialize Value จะใช้ตัวแปรนี้เมื่อต้องการให้ค่าที่เริ่มต้นมีค่าเท่ากับจำนวนนั้นๆ ที่ได้ตั้งเอาไว้ ซึ่งในโปรแกรมที่สร้าง ในการวัดผลตอบสนองเชิงความถี่ตั้งให้เท่ากับศูนย์ ทั้งขนาดและเฟส เพื่อที่การเก็บค่าในครั้งต่อไปจะไม่นำค่าเดิมมาคิดอีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



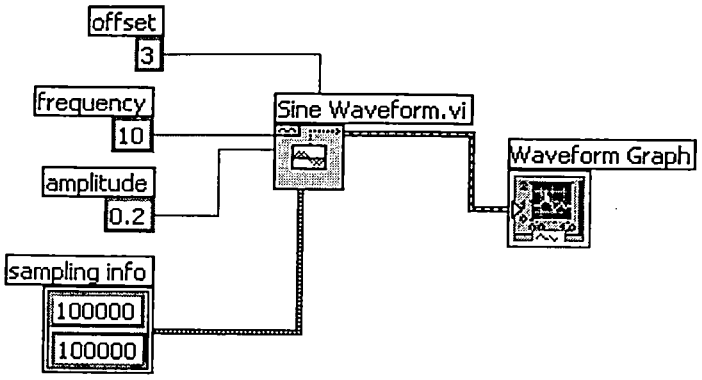
รูปที่ 3.5 แสดงโปรแกรม LabVIEW ของการออกแบบเครื่องมือวัดเพื่อการผลตอบสนองต่อความถี่

การออกแบบระบบเครื่องมือวัดเสมือน ในการวัดผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรจ่ายกำลังแบบสวิตช์ชิ่ง DC/DC ชนิด Buck ในเบื้องต้นนั้นจะต้องเข้าใจหลักการทำงานในภาพรวมของระบบควบคุมก่อนว่ามีหลักการทำงานอย่างไร แล้วจึงพิจารณาส่วนย่อยต่างๆอันประกอบไปด้วย การออกแบบวงจรที่ขับสัญญาณSine และDC ที่สามารถป้อนให้กับวงจร PWM Controllerได้สัญญาณ Pulse ตามที่ต้องการ และส่วนของวงจรBuck Converter และส่วนที่ออกแบบเครื่องมือวัดเสมือนในการวัดผลตอบสนองเชิงความถี่

3.2.3 การสร้างสัญญาณ Sin และ DC

การออกแบบวงจรเสมือนในการขับสัญญาณ Sin และ DC โดยที่สัญญาณ Sin มีความถี่10 Hz และขนาด 0.2 V และสัญญาณ DC 3 V โดยใช้โปรแกรม LabVIEW ดังรูปที่ 3.6

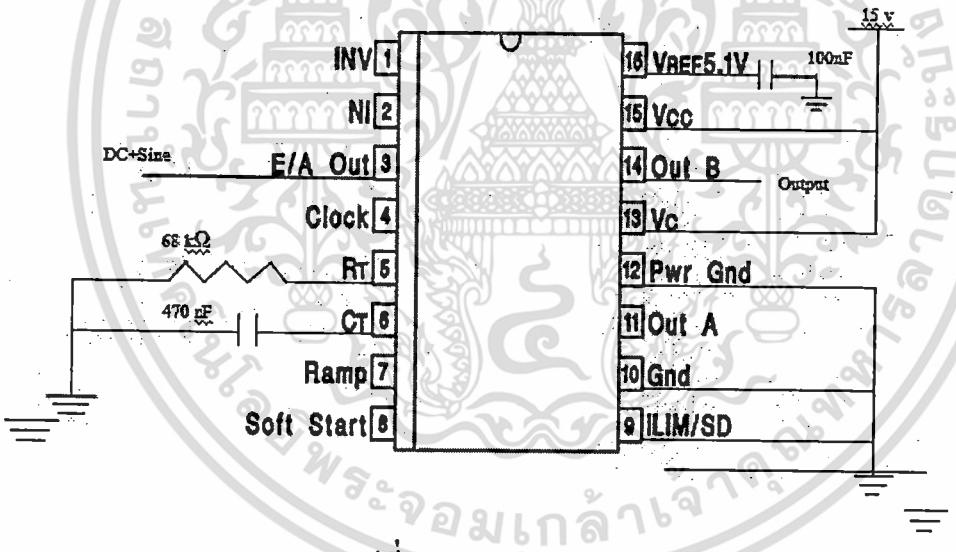
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 การออกแบบการขับสัญญาณ Sin และ DC

3.3 การออกแบบวงจร PWM Controller

การออกแบบวงจร PWM Controller เพื่อให้ได้สัญญาณ Pulse ความถี่ 40 kHz และมีการแก่วงของ Duty cycle ดังนั้นจึงต้องเลือกค่า R และC ที่ให้ได้ความถี่ 40 kHz แล้วต่อวงจรดังรูปที่ 3.7 โดยที่ สัญญาณ Sine และ DC ได้มาจากโปรแกรม LabVIEW

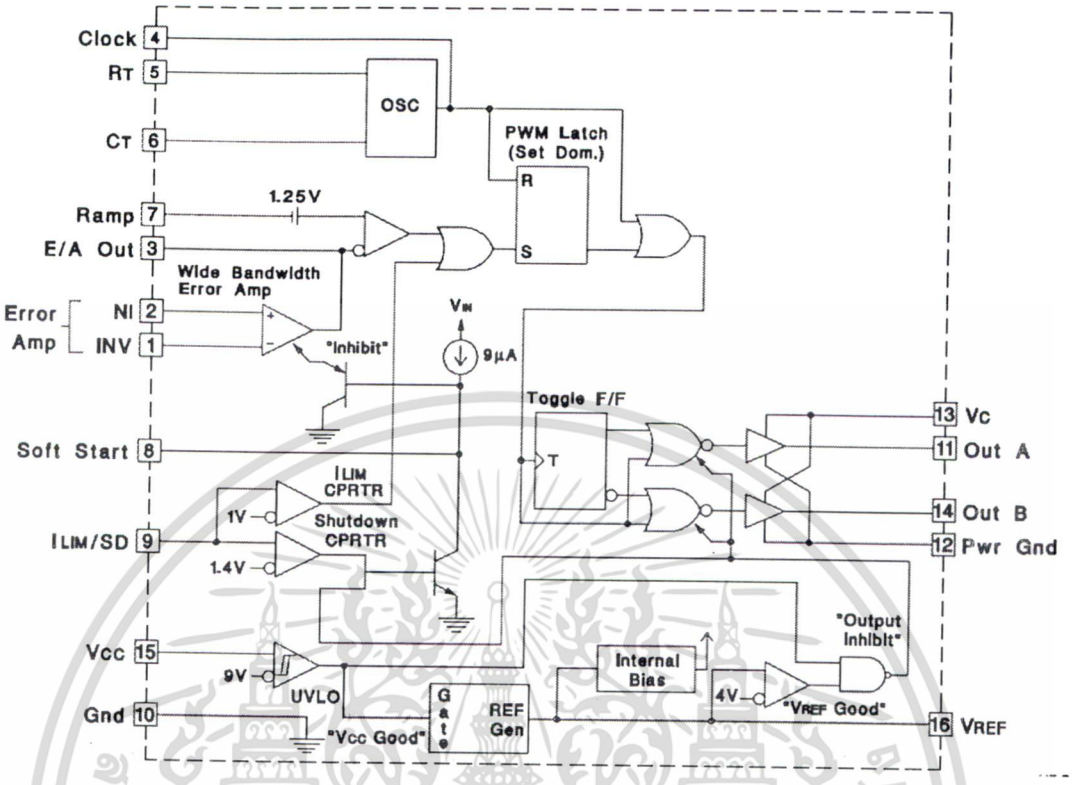


รูปที่ 3.7 การต่อวงจร PWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

Block Diagram ของ High Speed PWM Controller เป็นดังนี้

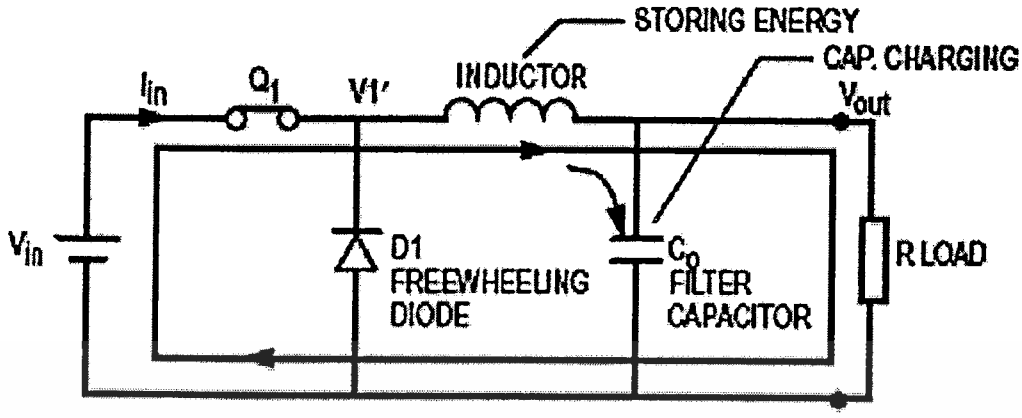


รูปที่ 3.8 PWM Block Diagram

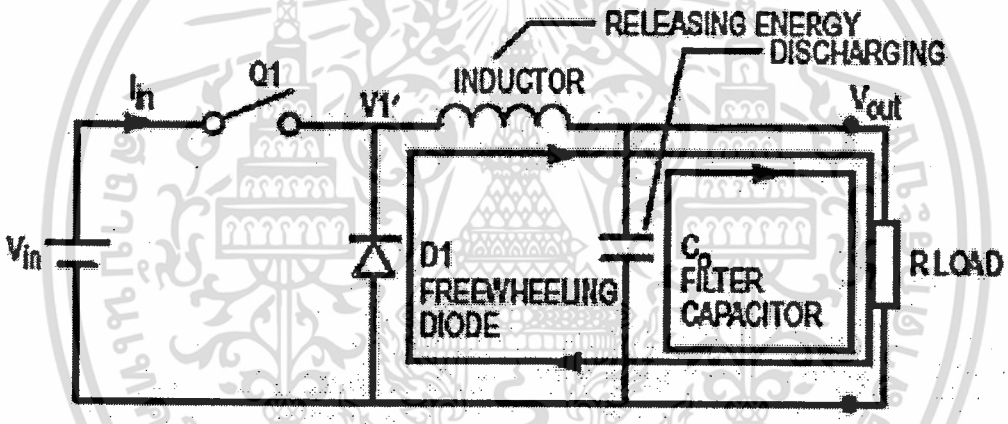
3.4 วงจรจ่ายกำลังแบบสวิตช์ชิ่ง DC/DC ชนิด Buck

วงจรจ่ายกำลังแบบสวิตช์ชิ่ง DC/DC ชนิด Buck ที่ถูกออกแบบให้ทำงานที่ความถี่ 40 kHz โดยหลักการทำงานของวงจรคือให้ MOSFET ทำหน้าที่เป็นสวิทช์ เปิด-ปิดวงจร ซึ่งถูกควบคุมด้วยสัญญาณ PWM ที่สร้างจาก PWM Controller UC3825 โดยเมื่อ MOSFET นำกระแสไฟฟ้า (ปิดวงจร) มีกระแสไหลผ่านวงจรดังรูปที่ 3.9 โดยมีกระแสไฟฟ้าส่วนหนึ่งไปยังตัวเก็บประจุ เมื่อ MOSFET หยุดนำกระแสไฟฟ้า (เปิดวงจร) ก็จะยังคงมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านโหลดอยู่อีกชั่วขณะหนึ่ง โดยกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลดได้มาจากสองแหล่งคือ ตัวเก็บประจุ และการที่ขดลวด Inductor ปล่อยพลังงานออกมา แสดงดังรูปที่ 3.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
84486



รูปที่ 3.9 การทำงานของวงจรจ่ายกำลังแบบสวิตช์ชิ่ง DC/DC ชนิด Buck ขณะที่ MOSFET นำกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 3.10 การทำงานของวงจรจ่ายกำลังแบบสวิตช์ชิ่ง DC/DC ชนิด Buck ขณะที่ MOSFET หยุดนำกระแส

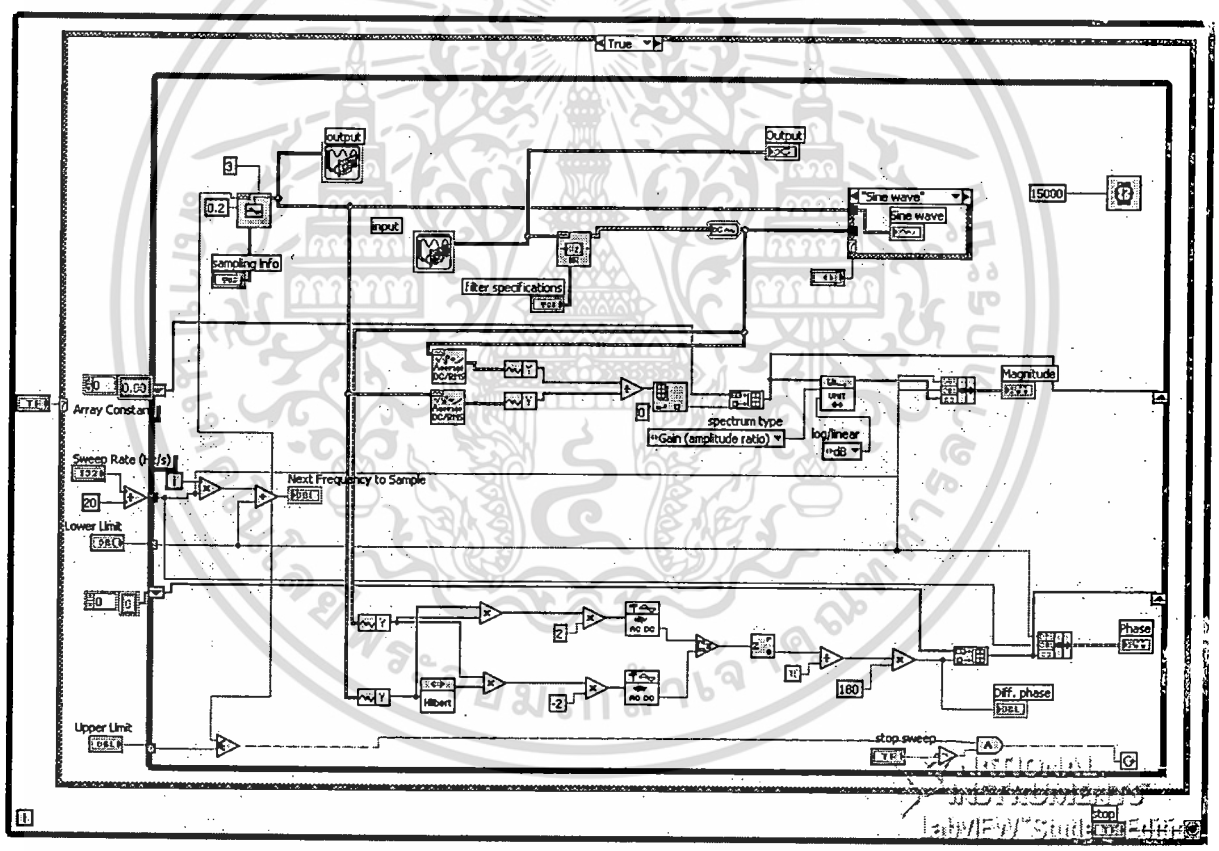
การเปิด-ปิดวงจรของ MOSFET จะรวดเร็วมาก (ประมาณ 20,000 ครั้งต่อวินาที หรือ 20 kHz ไปจนถึง 300,000 ครั้งต่อวินาที หรือ 300 kHz) เพื่อลดการ Ripple ของแรงดันไฟฟ้าที่ทางออก สำหรับการควบคุมกระแสไฟฟ้าทำได้โดยการเปลี่ยนช่วงเวลา Duty Cycle ที่ให้ MOSFET นำกระแสไฟฟ้าและหยุดนำกระแสไฟฟ้า ถ้าให้ MOSFET นำกระแสไฟฟ้าเป็นเวลานานก็จะมีกระแสไฟไหลผ่านโหลดมาก ถ้าให้ MOSFET นำกระแสเป็นเวลาน้อยก็จะมีกระแสไฟไหลผ่าน LOAD น้อยลงตามไปด้วย ส่วนการควบคุมแรงดันไฟฟ้าทำได้ด้วยวิธีการเดียวกัน แต่จะมีการตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตลอดเวลา ถ้าแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงก็จะทำการปรับเปลี่ยนช่วงเวลา Duty Cycle ให้กระแสไฟฟ้าไหลมากขึ้นหรือ

3.5 ส่วนออกแบบเครื่องมือวัดเสมือนในการวัดผลตอบสนองเชิงความถี่

ในการวัดผลตอบสนองเชิงความถี่ของการทำงานของวงจรจ่ายกำลังแบบสวิตช์ชิ่ง DC/DC ชนิด Buck โดยรับสัญญาณที่ทางออกจากวงจร Buck Converter เข้ามาทำการกรองผ่าน Band pass Filter เพื่อให้ได้เฉพาะสัญญาณ Small Signal มาทำการหาผลตอบสนองความถี่ โดยเปรียบเทียบขนาดและเฟสกับสัญญาณ Duty clycle เพื่อหาผลตอบสนองเชิงความถี่ ดังรูปที่ 3.10



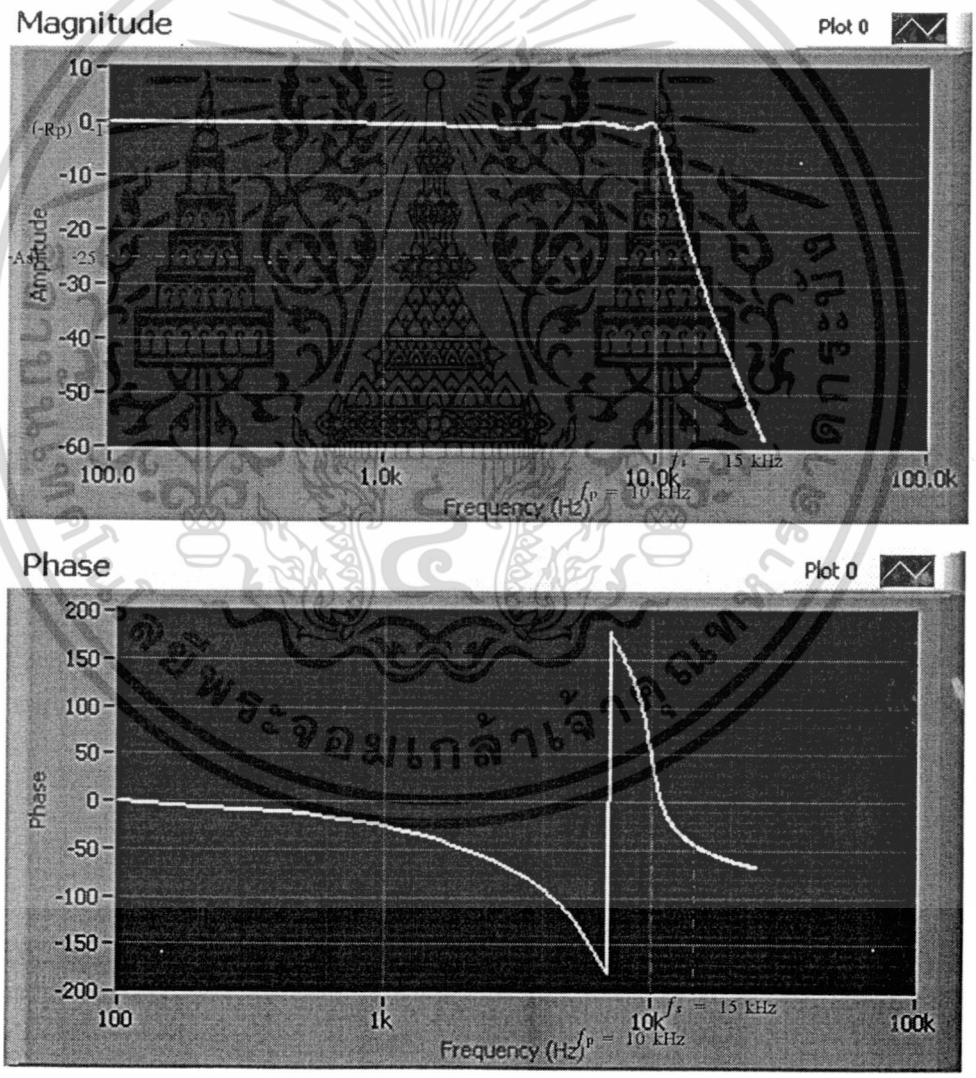
รูปที่ 3.10 Block Diagram ของเครื่องมือวัดเสมือนเพื่อหาผลตอบสนองความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองโครงงาน

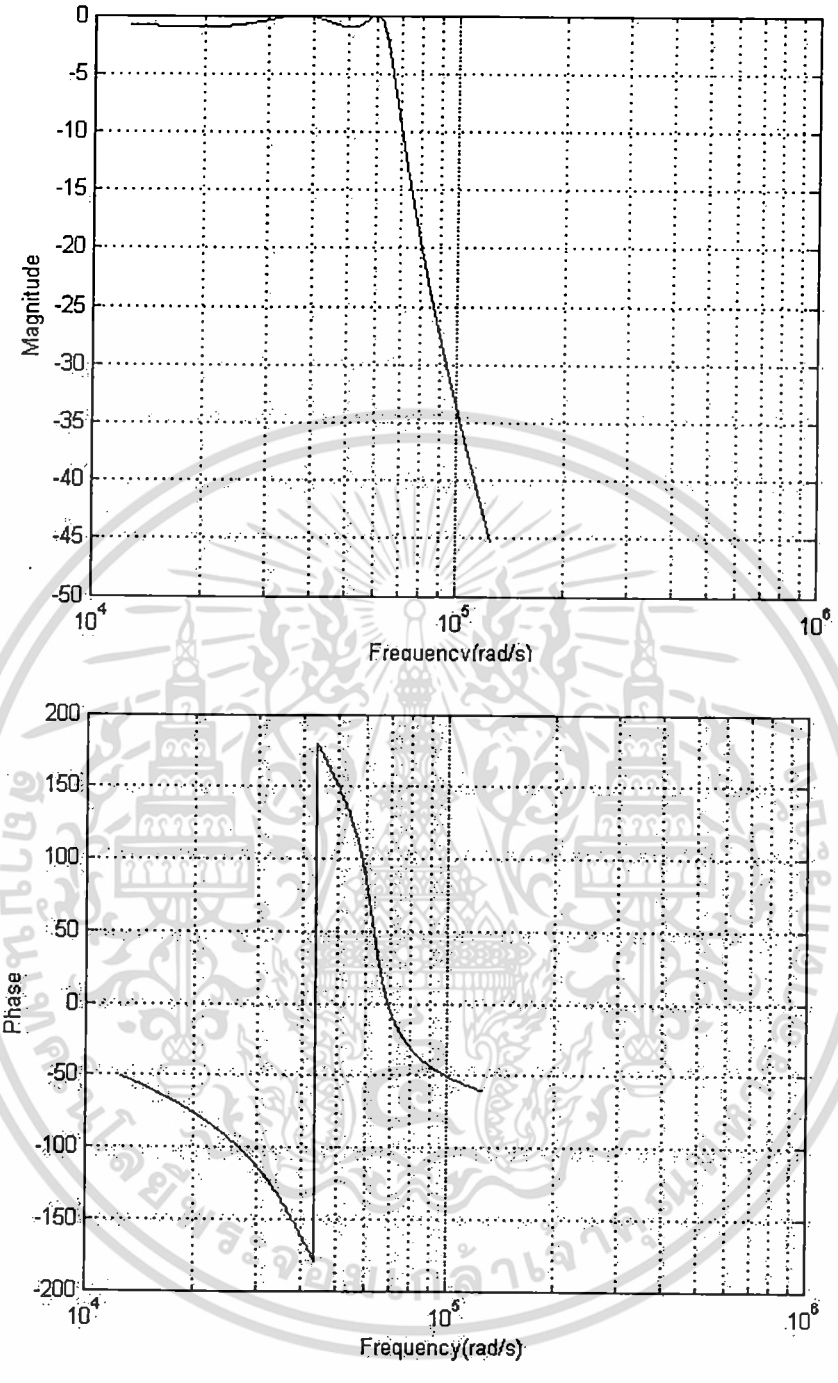
การทดลองเมื่อทำการทดสอบโปรแกรมที่ออกแบบขึ้น เพื่อสามารถวัดผลตอบตอบสนองความถี่ของระบบ การกรองสัญญาณ Analog Lowpass Filter, โดยออกแบบ Lowpass Filter ให้เป็นตามที่ต้องการ ดังนี้ความถี่สูงสุดที่ต้องการกรองสัญญาณเท่ากับ 25 kHz และความถี่ต่ำสุดที่ 100 Hz , Order 5 , Lower F_c (passband frequency) = 10 kHz, upper Fc (stopband frequency) = 15 kHz , PB Ripple (passband ripple) = 1 dB, SB Attenuation (stopband attennation) = 25 dB และ Topology แบบ Chebyshev ผลตอบสนองความถี่ที่ได้เป็น Bode Diagram ดังนี้



รูปที่ 4.1 Bode Plot ของระบบกรองสัญญาณ Analog Lowpass Filter จาก LabVIEW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

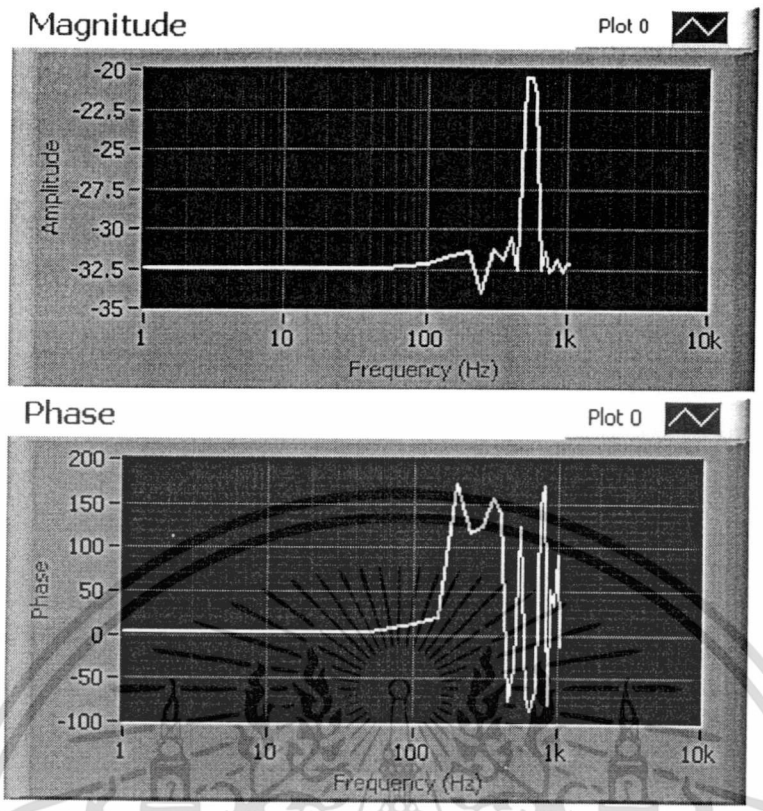
ผลตอบสนองความถี่ที่ได้จากการคำนวณ Matlab เป็นดังนี้



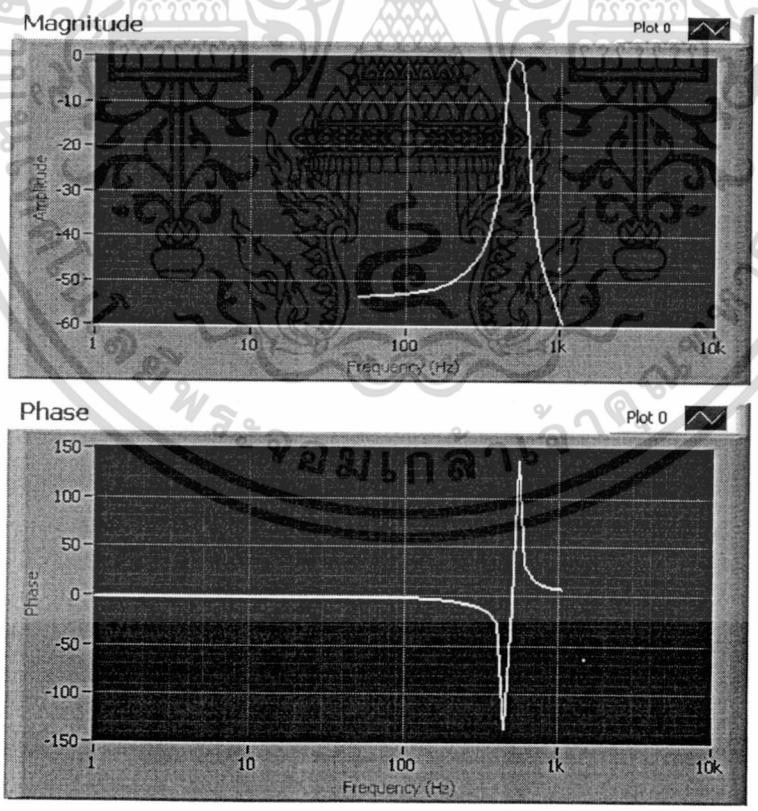
รูปที่ 4.2 Bode Plot ของของระบบกรองสัญญาณAnalog Lowpass Filter จากMatLab

การทดลองเมื่อป้อนสัญญาณ Sin + DC ที่มีขนาดของ Sin เท่ากับ 2mV และสัญญาณ DC 3V ให้กับ PWM ที่ได้ออกแบบค่าของ R และ C แล้วทำให้ได้สัญญาณ Pulse ที่มีความถี่ 40 kHz ตามต้องการแล้วเพื่อป้อนให้กับวงจรจ่ายกำลังแบบสวิตช์ชิ่ง DC/DC ชนิด Buck เพื่อควบคุมวงจร แล้ววัดผลตอบสนองความถี่ของวงจรได้ผลตอบสนองเชิงความถี่ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ผลที่ได้จากการ Simulate สัญญาณในคอมพิวเตอร์เป็นดังนี้



รูปที่4.3 Bode Plot ของผลตอบสนองความถี่ของวงจร Buck Converter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลโครงงาน ปัญหาที่พบและแนวทางแก้ไข

5.1 สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองระบบการสร้างเครื่องมือวัดเสมือน เพื่อวัดผลตอบสนองความถี่ พบว่าผลตอบสนองถี่ของระบบการกรองสัญญาณ Lowpass filter แบบ Chebyshev มีคุณสมบัติเป็นไปตามที่ต้องการคือ ความถี่สูงสุดที่ต้องการกรองสัญญาณเท่ากับ 25 kHz และความถี่ต่ำสุดที่ 100 Hz , Order 5, Lower F_c (passband frequency) = 10 kHz , upper Fc (stopband frequency) = 15 kHz , PB Ripple (passband ripple) = 1 dB , SB Attenuation (stopband attenuation) = 25 dB ที่ Simulink Matlab ได้ผลตอบสนองความถี่เป็นไปตามที่ต้องการและเมื่อเปรียบเทียบผลตอบสนองความถี่ที่ได้จาก LabVIEW พบว่าได้ผลตอบสนองความถี่เหมือนกับที่ใช้ Matlab คำนวณไว้ ดังนั้นจึงสามารถใช้ LabVIEW ในการหาผลตอบสนองความถี่ได้และจากการออกแบบเครื่องมือวัดเสมือนเพื่อหาผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรจ่ายกำลังแบบสวิตช์ชิ่ง DC/DC ชนิด Buck

ผลการทดลองระบบการสร้างเครื่องมือวัดเสมือนเพื่อวัดผลตอบสนองทางความถี่โดยวิธี Bode Plots โดยการเปรียบเทียบสัญญาณก่อนเข้าวงจรจ่ายกำลังแบบสวิตช์ชิ่ง DC/DC ชนิด Buck กับสัญญาณที่ออกมาจากวงจร โดยผ่านการ์ด PCI – 6230 ซึ่งเป็นฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการรับและส่งสัญญาณจากโปรแกรม LabVIEW กับอุปกรณ์ภายนอก ซึ่งในการทดลองใช้การกรองสัญญาณแบบ Bandpass filter ชนิด Chebyshev ซึ่งเป็นโปรแกรม VI ที่มีมาสำเร็จรูปอยู่แล้วในโปรแกรม LabVIEW และจากการทดลองทำการทดลองที่ย่านความถี่สูงสุดที่ต้องการกรองสัญญาณเท่ากับ 1kHz และความถี่ต่ำสุดคือ 0 Hz โดยกำหนดคุณสมบัติของวงจรกรองสัญญาณดังนี้คือ ให้มี order = 4, Lower cut-off Frequency(Lower Fc) = 450 Hz, Upper cut-off Frequency(Upper Fc) = 550 Hz, Passband ripple(Rp) = 1 dBและ Stopband Attenuation(As) = 60 dB จากผลการทดลองที่ได้เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับการจำลองในโปรแกรม LabVIEW นั้นจะเห็นได้ว่า กราฟที่ได้นั้นผิดเพี้ยนไปมากเนื่องจากผลของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และในการส่งสัญญาณจากโปรแกรม LabVIEW ผ่านการ์ด PCI –

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6230 ไปยังวงจรจ่ายกำลังแบบสวิตช์ชิ่ง DC/DC ชนิด Buck นั้น สัญญาณที่ออกไปช้ากว่าในการประมวลผลในโปรแกรม LabVIEW ทำให้ผลการทดลองผิดเพี้ยนไปมาก

5.2 ปัญหาที่พบและแนวทางแก้ไข

การศึกษาและทำโครงงานนี้ในช่วงแรกเกิดปัญหาคือ การติดตั้งการ์ด PCI – 6230 ซึ่งเป็นฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอก (ในที่นี้คือวงจรจ่ายกำลังแบบสวิตช์ชิ่ง DC/DC ชนิด Buck) เนื่องจากในการติดตั้งครั้งแรกนั้นได้ติดตั้งกับคอมพิวเตอร์ที่มีคุณสมบัติ ซึ่งไม่เพียงพอต่อความต้องการของการ์ดและตัวโปรแกรม LabVIEW นี้ จึงทำให้ไม่สามารถใช้งานได้สมบูรณ์ เนื่องจากการ์ดและโปรแกรมนี้ต้องติดตั้งกับคอมพิวเตอร์ที่มีคุณสมบัติดีมากพอสมควรถึงจะใช้งานได้ดี ปัญหาต่อมาคือในการส่งสัญญาณอนาล็อก จากโปรแกรม LabVIEW ผ่านการ์ด PCI – 6230 นั้น สัญญาณอนาล็อกที่ออกไปนั้นช้ากว่าการประมวลผลในโปรแกรม LabVIEW จึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ผลการทดลองผิดเพี้ยนไปมาก ซึ่งวิธีการแก้ปัญหาก็คือจัดซื้อชุดคอมพิวเตอร์ที่มีคุณสมบัติสูงๆ เนื่องจากคอมพิวเตอร์ที่อยู่ถึงจะสามารถใช้งานได้แต่ก็ยังไม่เพียงพอต่อความต้องการของการ์ด PCI – 6230 และตัวโปรแกรม LabVIEW

ในส่วนปัญหาที่พบและยังไม่ได้ปรับปรุงแก้ไขได้แก่ ปัญหาที่ระบบจะมีสัญญาณรบกวนเข้ามาหากมีการต่อฮาร์ดแวร์เข้ากับคอมพิวเตอร์ ซึ่งสัญญาณที่รับเข้ามาประมวลผลนั้นได้นำไปผ่านตัวกรองสัญญาณ (Filter) ชนิดต่างๆ ซึ่งเป็น VI ในตัวโปรแกรม LabVIEW ที่มีมาสำเร็จรูปอยู่แล้ว พบว่าสัญญาณที่กรองออกไปมีสัญญาณที่เรียบ แต่ยังมีการเลื่อนของเฟสเกิดขึ้น ดังนั้นแนวทางในการแก้ไขปัญหาที่ดีที่สุดคือการออกแบบตัวกรองสัญญาณ (Filter) แบบ Equiripple ซึ่งมีคุณสมบัติ Linear Phase คือ ผลตอบสนอง (ขนาด) ความถี่เป็นสมมาตรกัน จะทำให้ไม่เกิดการเลื่อนของเฟสเกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้จัดสรรงบประมาณสำหรับทุนวิจัยนี้ และภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมที่อำนวยความสดวกในการทำวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. Lewis H. Paul, Yang Chang, "Basic Control Systems Engineering", Prentice Hall International INC, 1997.
2. เจริญ เพชรมุณี, "เรียนลัด LabVIEW", ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2547.
3. ฉมัยพร สุขสังข์, วิญญ์ เอกรังษี, "การประยุกต์ใช้งานโปรแกรม LabVIEW", ปริญญานิพนธ์, ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549.
4. Robert H. Bishop, "LabVIEW Express", New Jersey: Pearson Prentice Hall , 2006.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้