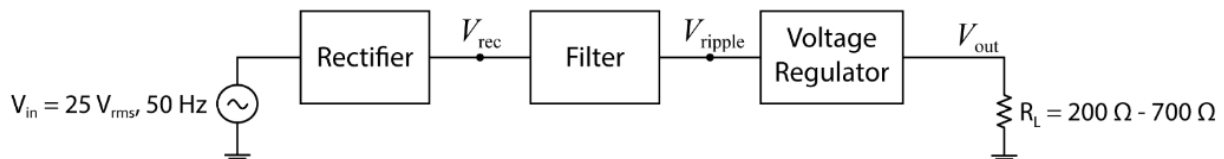


Midterm Project: Voltage Rectifier Circuits

ความต้องการในการออกแบบ

- วงจรใช้กับแรงดันไฟฟ้าอินพุต(Input Voltage, V_{in}) ขนาด $25 V_{rms}$ ที่ความถี่ 50Hz
- แรงดันไฟฟ้ากระเพื่อม (Ripple Voltage, V_{ripple}) ต้องไม่เกิน $30 mV_{pp}$
- แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตกระแสตรง (DC Output Voltage, $V_{out,DC}$) อยู่ในช่วง 11V –12V โดยใช้โหลด (R_L) ในช่วง 200Ω - 700Ω
- จำกัดขนาดของตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรกรองแต่ละตัวต้องไม่เกิน $470 \mu F$
- จำกัดขนาดของขดลวดเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรกรองต้องไม่เกิน 150 H
- อนุญาตให้สมมุติค่าของตัวต้านทานที่ใช้ในวงจรกรองให้มีค่าใดก็ได้



ภาพที่ 1 ภาพโครงสร้างวงจรสร้างไฟตรง

ขั้นตอนการออกแบบ VOLTAGE RECTIFIER

ดูความต้องการวงจร

- เริ่มต้นจากการศึกษาความดันไฟฟ้าที่ไหลเข้าวงจร ความถี่ และความดันไฟฟ้าที่ต้องการ
- ในวงจรนี้จ่ายแรงดันไฟฟ้าขนาด 25 โวลต์ ความถี่ 50 Hz ต้องการให้แรงดันออกจากวงจรถูกกรองจนเรียบ มีความดันไฟฟ้าอยู่ที่ 11-12 โวลต์ ภายในวงจรต้องการให้เกิดความดันกระเพื่อม ไม่เกิน 30 mVpp โดยขนาดตัวเก็บประจุในวงจรกรองมีค่าไม่เกิน 470 μ F และลวดเหนี่ยวนำไม่เกิน 150 mH ความต้านทานเท่าไรวงจรกรองก็ได้
- เราต้องออกแบบโดยใช้ Center trapped ในวงจร และใช้ RC-pi ในวงจรกรอง

ออกแบบวงจร RECTIFIER

วงจร Rectifier ใช้แบบ Center Trapped โดยต้องเลือกไดโอดที่พอดีกับความดันไฟฟ้าวงจร; ในที่นี้เราเลือกใช้ SS3P5 แบบ Schottky เพราะมีประสิทธิภาพสูง มีความสูญเสียพลังงานน้อย Breakdown voltage สูงกว่าแหล่งจ่าย ทนความร้อนสูง แรงดันไฟฟ้าภายในไม่สูงมาก และ forward voltage drop ต่ำ

ออกแบบวงจร FILTER

ในการออกแบบ RC-pi Filter ที่มีขนาดตัวเก็บประจุ ไม่เกิน 470 μ F ต้องเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าใหญ่เพราะจะทำให้กระแสเรียบขึ้น แต่ก็มีเวลาในการชาร์จที่นานขึ้น จึงไม่ควรออกแบบให้ใหญ่เกินไป และเราควรให้ค่าความต้านทานไม่มากเกินไปเพราะจะแบ่งแรงดันไปเยอะเกินไป จนความดันกระเพื่อมไม่ถึงเกณฑ์ที่กำหนด

ออกแบบวงจร REGULATOR

การออกแบบวงจร Regulator ต้องคำนึงถึงโหลดที่จะนำมาต่อและแรงดันที่จะถูกแบ่งไป เราต้องเลือก zener diode ที่มีค่า Breakdown Voltage อยู่ในค่าเดียวกันกับที่เราต้องการ นั่นคือ 11-12 โวลต์ แต่ก็ต้องรับ reverse current ได้ในระดับที่วงจรเราออกแบบไว้

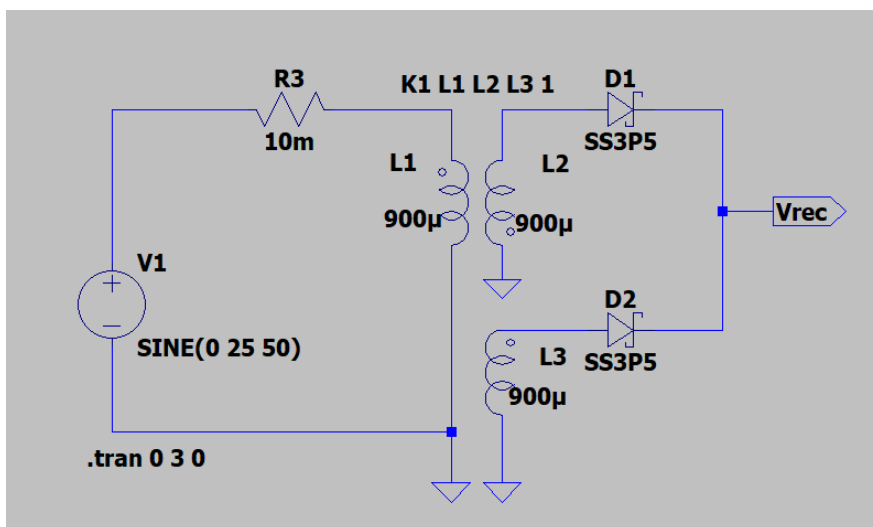
DEBUG วงจร

ในการออกแบบวงจรมีข้อผิดพลาดเสมอ เราต้องตรวจสอบวงจรในทุกๆส่วน และหาความเป็นไปได้มากที่สุดที่จะทำให้วงจรเรามีประสิทธิภาพสูงสุด

อภิปรายวงจร

วงจร Rectifier

วงจร Rectifier แบบ Center trapped เริ่มจากการใช้ source ในภาพที่ 2 ที่มีแรงดันขนาด 25 V ด้วยความถี่ 50 Hz เป็น sine wave โดยทำมาผ่าน ขดลวดเหนี่ยวนำในรูปแบบของ Transformer ในขณะที่เราต้องการให้กระแสไฟฟ้าไหลจึงใส่ R3 ขนาด $10\text{ m}\Omega$ และลวดเหนี่ยวนำออกแบบให้ง่ายแรงดันที่เท่ากันทั้ง L2 และ L3 เพื่อที่จะสร้างวงจร Full-wave rectifier จึงต้องทำให้มีแรงดันเท่ากัน เราใช้ไดโอด SS3P5 ซึ่งเป็น Schottky diode ซึ่งจะมีข้อดีคือ forward voltage drop ต่ำ switching action เร็ว ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เราต้องการในการออกแบบวงจร กล่าวคือเวลาในการสวิตช์กระแสเร็ว และแรงดันไฟฟ้าที่ผ่านไดโอดจะไม่ลดมาก สำหรับรายละเอียดของไดโอดนี้จะเป็นไปตามภาพที่ 3 สาเหตุหนึ่งที่เราเลือกไดโอดตัวนี้ก็คือ มี Maximum peak reverse voltage 50 โวลต์ ซึ่งน้อยกว่าค่าแรงดัน source



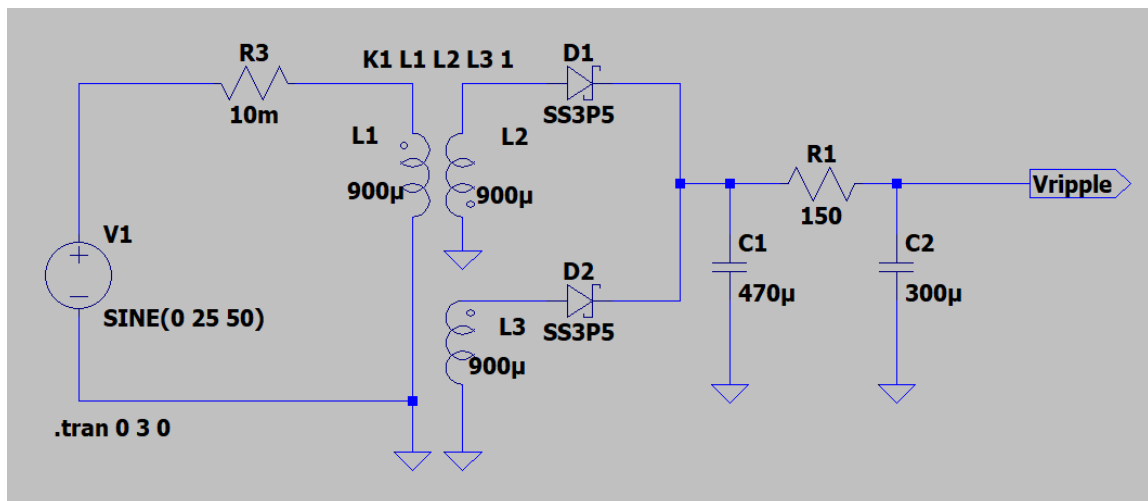
ภาพที่ 2 ภาพวงจร Center trapped rectifier

MAXIMUM RATINGS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)				
PARAMETER	SYMBOL	SS3P5	SS3P6	UNIT
Device marking code		35	36	
Maximum repetitive peak reverse voltage	V_{RRM}	50	60	V
Maximum average forward rectified current (fig. 1)	$I_{F(AV)}$	3.0		A
Peak forward surge current 8.3 ms single half sine-wave superimposed on rated load	I_{FSM}	45		A
Non-repetitive avalanche energy at $T_J = 25^\circ\text{C}$, $I_{AS} = 1.5\text{ A}$, $L = 10\text{ mH}$	E_{AS}	11.25		mJ
Voltage rate of change (rated V_R)	dV/dt	10 000		V/ μs
Operating junction and storage temperature range	T_J, T_{STG}	-55 to +150		$^\circ\text{C}$

ภาพที่ 3 ตาราง Maximum Rating

วงจร filter

วงจร RC-pi Filter ตามภาพที่ 4 มีหน้าที่กรองสัญญาณให้นิ่งขึ้น วงจร Pi filter มีข้อดีในการกรองสัญญาณ DC ที่มีขนาดสูง และกระแสเพื่อมต่ำ แต่สัญญาณอาจจะไม่เรียบมาก และมี PIV สูง โดยมี C2 ทำหน้าที่เป็น low pass filter เพื่อกรองสัญญาณ AC ออก การออกแบบ C1 และ C2 สามารถทำได้โดยการ trial and error เมื่อ C1 มีขนาดใหญ่จะส่งผลให้ สัญญาณเรียบขึ้นและเวลาในการชาร์จน้อยลงเล็กน้อย แต่ C2 จะทำให้ สัญญาณเรียบขึ้นมาก แต่จะทำให้เวลาในการชาร์จเริ่มแรกนานขึ้นมาก และเมื่อเราเพิ่ม R1 จะส่งผลให้ขนาด แรงดันไฟฟ้าลดลงและเวลาในการชาร์จเพิ่มขึ้นมากเพราะต้องมีการแบ่งกระแสไปยัง C1 มากขึ้น สรุปคือ C1 มีหน้าที่กรอง AC ซึ่งสามารถตั้งค่าไว้ให้สูงระดับหนึ่งได้ แต่ต้องไม่ให้ R1 มีค่ามากจนเกินไปเพื่อกันการแบ่ง กระแสที่เยอะเกินไป ส่วน C2 ไม่ควรมีค่ามากเพราะว่าจะส่งผลให้แรงดันชาร์जनานเกินไป และเราอาจดูความ ต้านทานในวงจร regulator ประกอบเพื่อดูการแบ่งกระแสไม่ให้อัน C2 มากจนเกินไปได้โดยการตั้งค่าความ ต้านทานไว้มากกว่า X_c มากๆ โดยที่ $X_{C2} = (j \cdot 2\pi \cdot f \cdot C_2)^{-1} = -10.61j \, \Omega$ ซึ่งน้อยกว่า R ในวงจร regulator มาก



ภาพที่ 4 ภาพวงจร RC-pi Filter

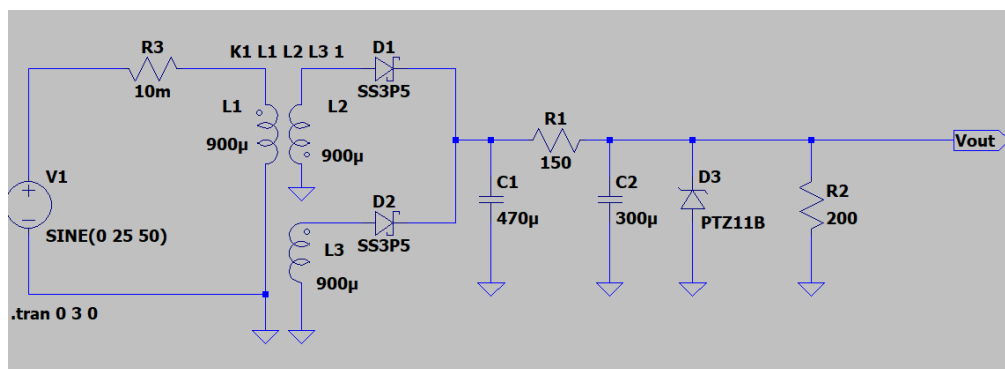
วงจร Regulator

วงจร Regulator มีการใช้ Zener diode เพื่อกรองสัญญาณกระแสเพื่อบางส่วนออกไป และมีการต่อกับโหลด 200 Ω และ โหลด 700 Ω ตามภาพที่ 5 การเลือกใช้ Zener diode มีวิธีเลือกโดยการเลือกที่ Breakdown Voltage โดิน PTZ11B มี Breakdown Voltage อยู่ที่ 11 V ซึ่งตรงกับระยะแรงดันไฟฟ้าที่เราต้องการ โดย ไดโอดตัวนี้มี power dissipation 1000 mW จาก $P = I \cdot V$ เราพิจารณา I_{\max} ที่ 80% และ I_{\min} ที่ 10% เราจะได้ I_{\max} เท่ากับ 72.73 mA และ I_{\min} เท่ากับ 18.18 mA จากนั้นนำมาหา ช่วงของความต้านทาน R2 โดยต่อความต้านทานต่ำ ๆ อนุกรมกับ D3 และ R2 ตามรูปที่ 6 และวัดกระแสที่ไหลผ่าน

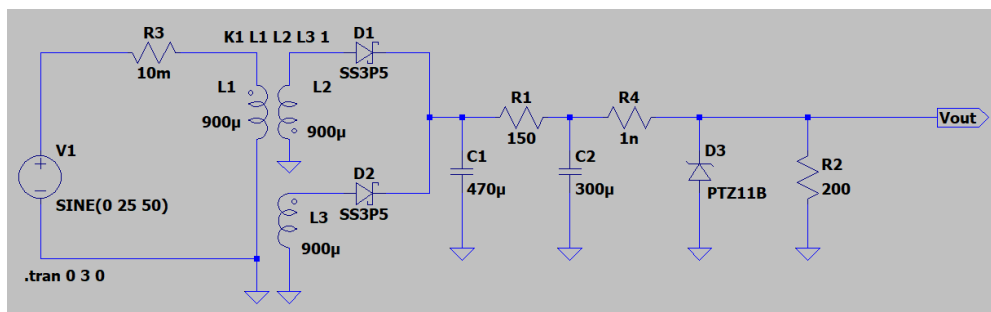
$$\text{จะได้ว่า } I_{R4} = I_{D3} + I_{R2} \text{ หรือถ้าจัดรูปจะได้ว่า } R = \frac{V_{out}}{|I_{R4}| - \left(\frac{P}{V_{out}} \cdot (x\%)\right)}$$

เมื่อเราแทนค่าแล้วจะได้ $R_2 = 1,070.8 \Omega$ ที่ 80% และ $R_2 = 169.71 \Omega$ ที่ 20%

ซึ่งมีค่าครอบคลุม 200-700 Ω ในกรณีของไดโอดที่มี power dissipation 500 mW จะมีค่าความต้านทาน สูงสุดที่ 235.87 Ω ทำให้เราไม่สามารถลด power dissipation ได้แม้ว่าจะกินพลังงานมากก็ตาม

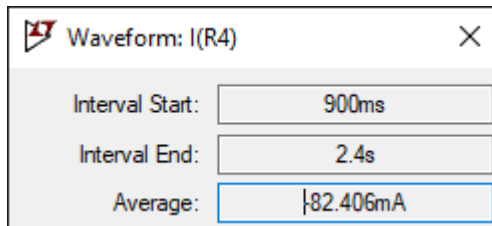


ภาพที่ 5 ภาพวงจร regulator ต่อกับโหลด 200 Ω

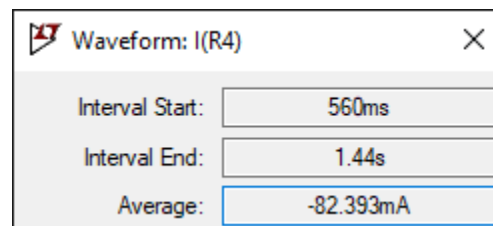


ภาพที่ 6 ภาพวงจร regulator ที่ต่อตัวต้านทานเพื่อวัดกระแสที่ R_4

จากการนำ R_4 ขนาดเล็กหลายๆมาใส่เปรียบเสมือน Ammeter ตามภาพที่ 6 และสามารถวัดกระแสเพื่อ
 คำนวณหาความต้านทานโหลดสูงสุดและต่ำสุดที่สามารถนำมาต่อได้ โดยอิงจาก power dissipation ของแต่
 ละไดโอด และแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการ จะได้กระแสที่ใกล้เคียงกันสำหรับ โหลด $200\ \Omega$ และ โหลด $700\ \Omega$
 ตามภาพที่ 7 และภาพที่ 8



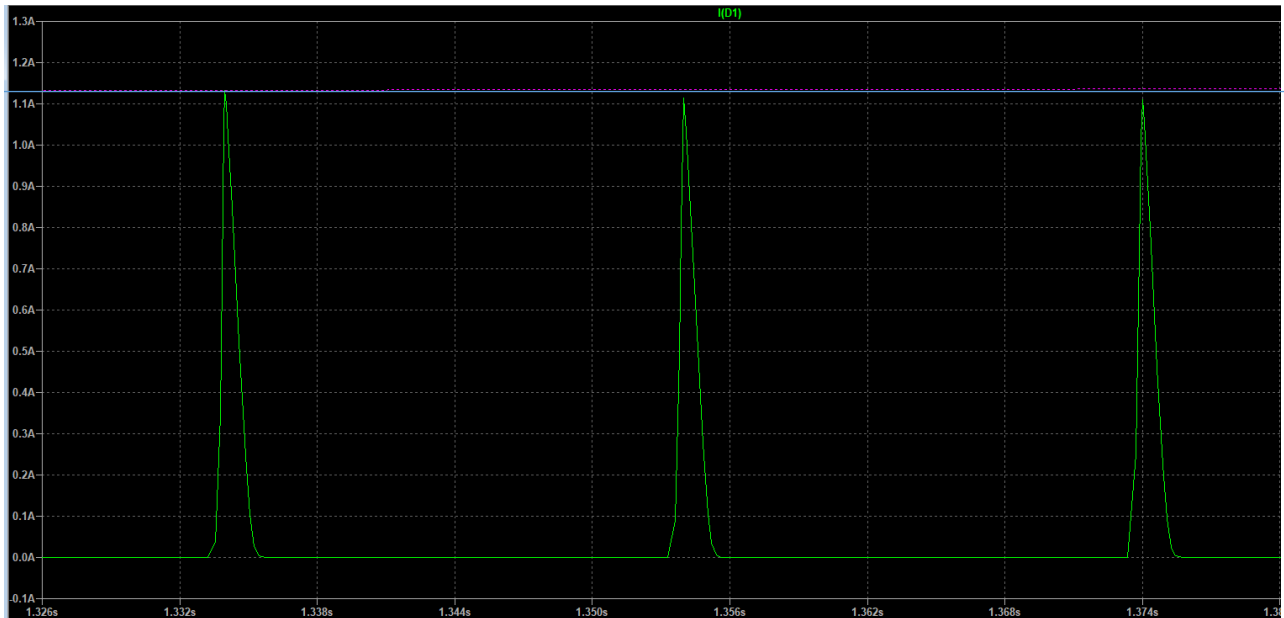
ภาพที่ 7 ภาพกระแสเฉลี่ยของ R_4 เมื่อโหลด $200\ \Omega$



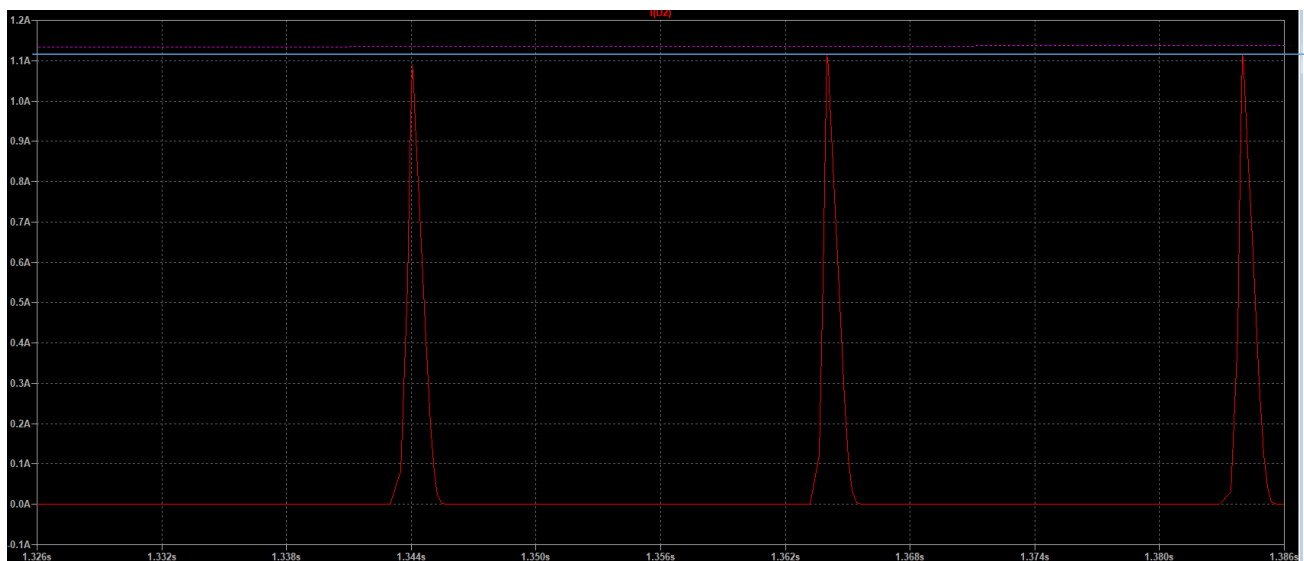
ภาพที่ 8 ภาพกระแสเฉลี่ยของ R_4 เมื่อโหลด $700\ \Omega$

กราฟที่วัดได้จากวงจร

ภาพกราฟกระแสไฟฟ้าผ่านไดโอด และแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมไดโอดที่ใช้ในวงจร rectifier ภาพที่ 9 และภาพที่ 10 สามารถใช้ได้ทั้งโหลด $200\ \Omega$ และ โหลด $700\ \Omega$ สังเกตได้ว่าทั้งสองกราฟเป็นลักษณะกราฟ forward current เทียบกับกราฟ IV ของไดโอด ทั้งสองกราฟมีกระแสสูงสุดประมาณ 1.1 A

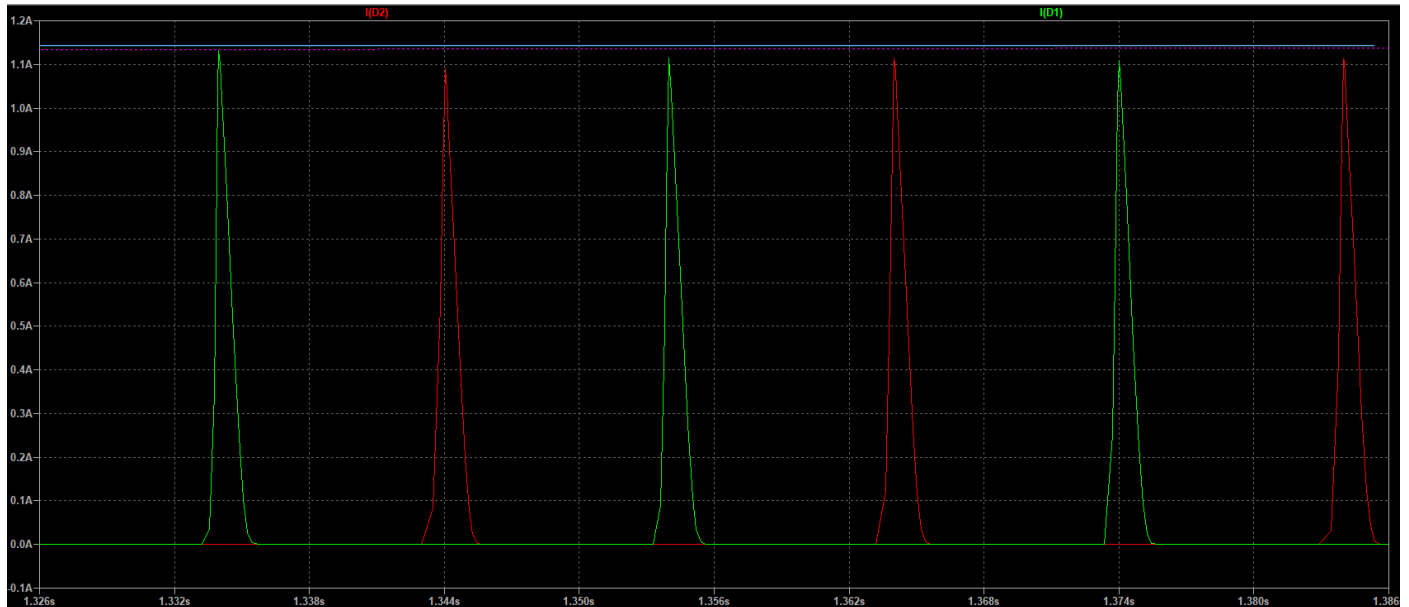


ภาพที่ 9 ภาพกราฟกระแสไฟฟ้าผ่านไดโอด D1

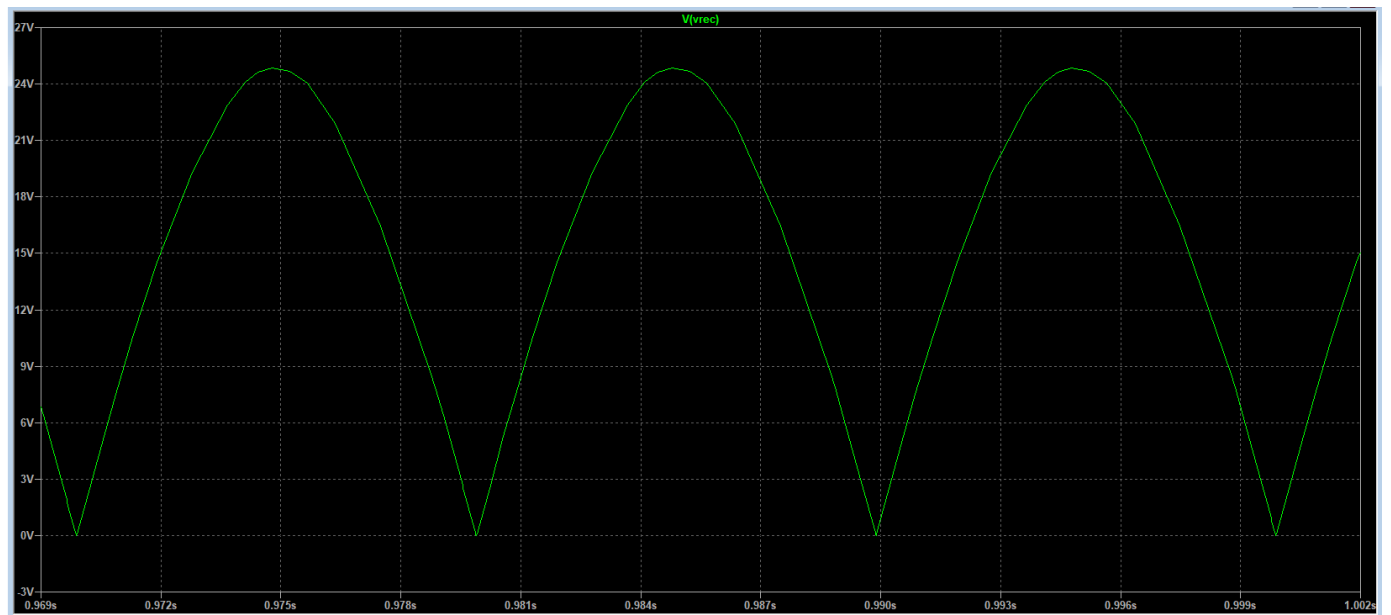


ภาพที่ 10 ภาพกราฟกระแสไฟฟ้าผ่านไดโอด D2

เมื่อนำกราฟทั้งสองมาพล็อตในแกนเดียวกันจะมีลักษณะที่เป็นคาบ ตามภาพที่ 11 และเราจะได้ภาพที่ 12 เป็นกราฟแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมไดโอด หรือ V_{rec} นั่นเอง สังเกตได้ว่าเป็นกราฟ Full-wave rectifier



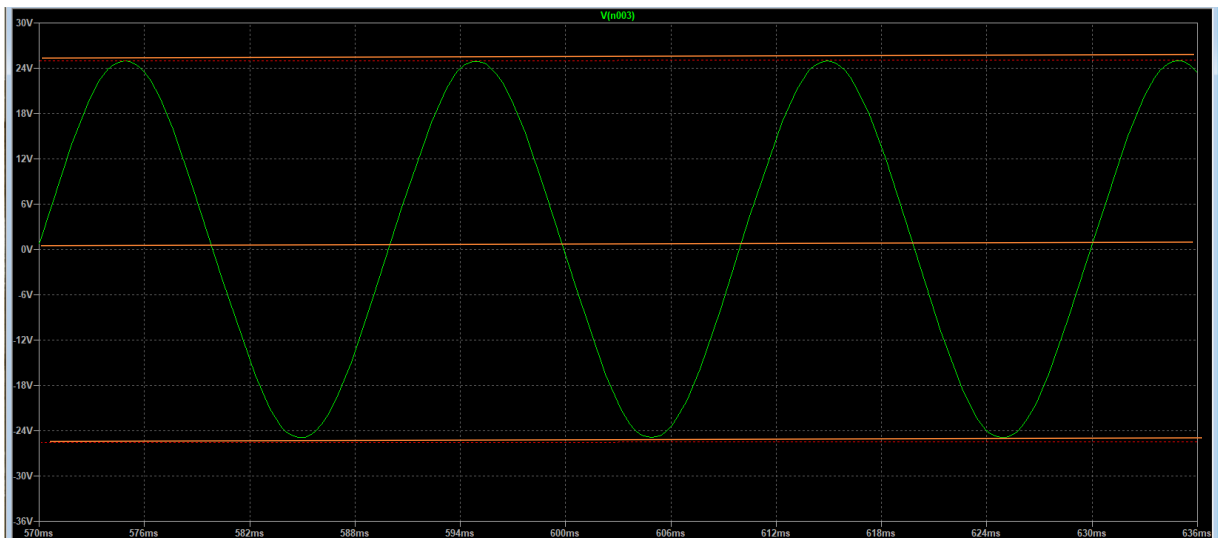
ภาพที่ 11 ภาพกราฟกระแสไฟฟ้าผ่านไดโอด D1 และ D2



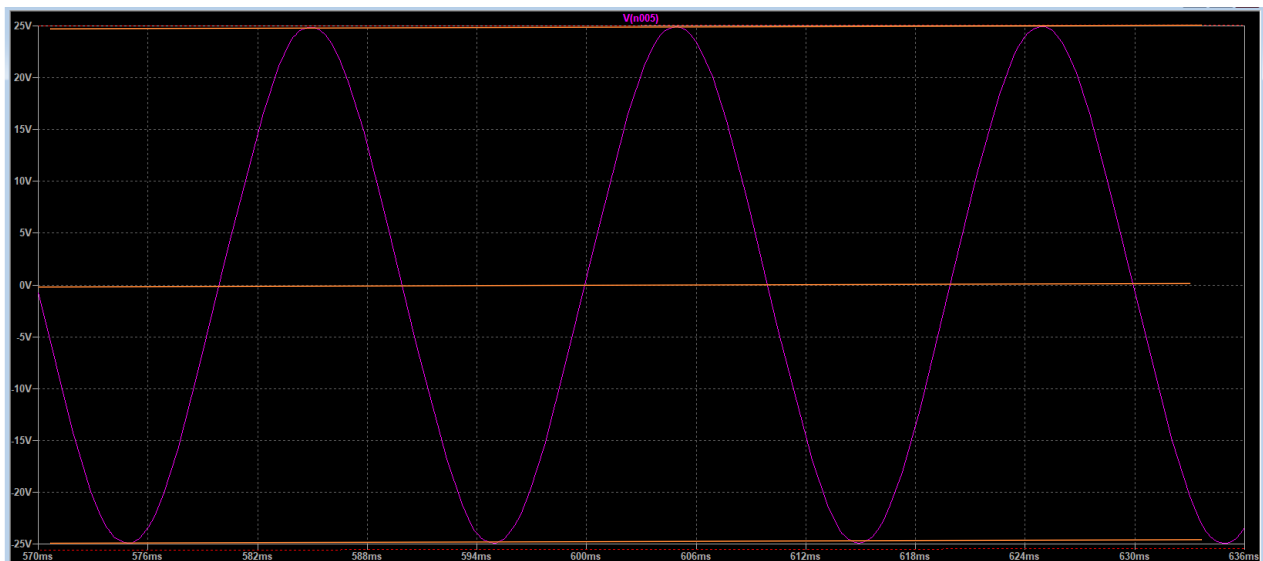
ภาพที่ 12 ภาพกราฟ V_{rec}

กราฟแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม และ Peak Inverse Voltage ของไดโอด

จากภาพที่ 13 และ 14 จะพบว่าเป็นกราฟชนิดเดียวกัน ความถี่เท่ากัน 50 Hz และมี ขนาดแรงดันไฟฟ้า 25 V เท่ากัน โดยสิ่งที่ต่างคือเฟส มาจากการต่อแบบ Center trapped โดยที่กราฟจะเหมือนกันทั้งโหลด 2 แบบ

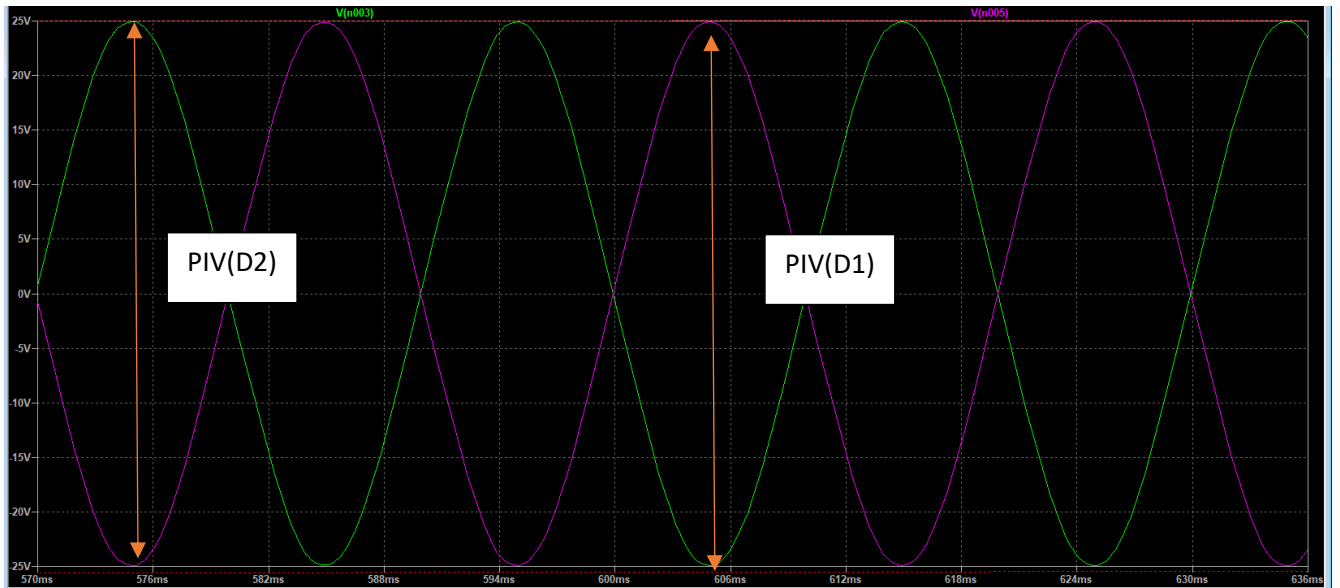


ภาพที่ 13 ภาพกราฟ V_{D1}



ภาพที่ 14 ภาพกราฟ V_{D2}

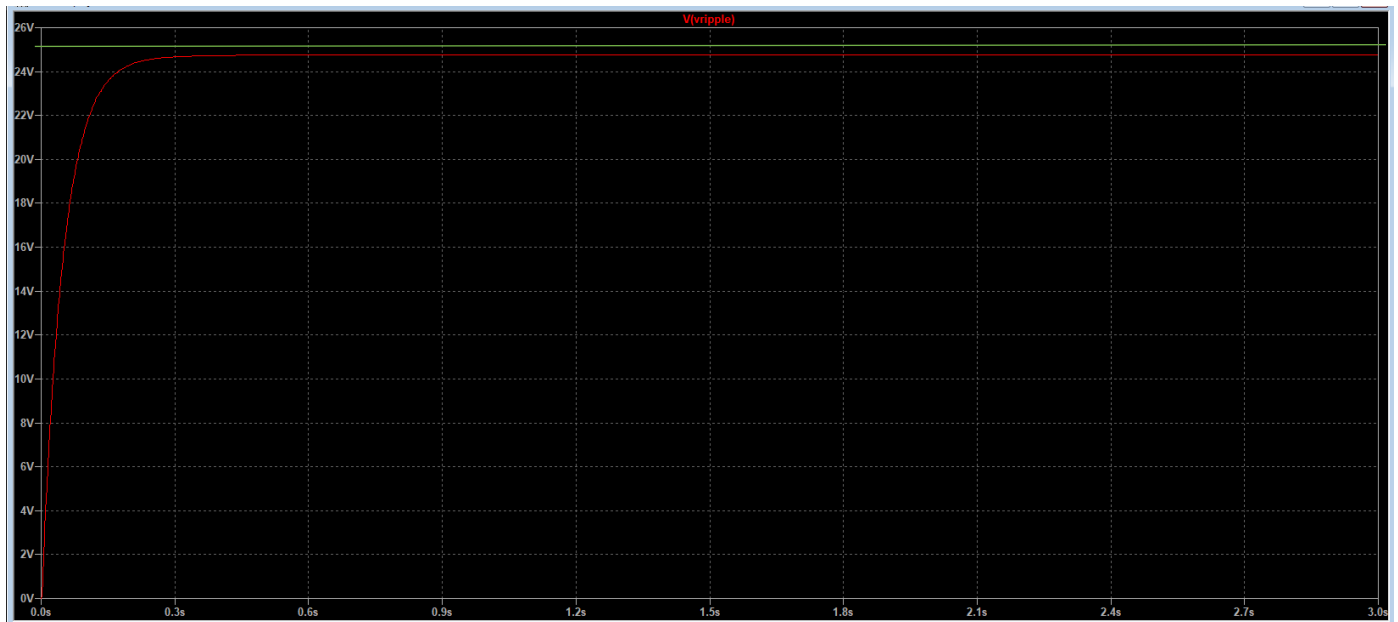
PIV ของ D1 และ D2 มีค่าเท่ากัน คือ 50 V ซึ่ง PIV หาได้เมื่อไดโอดนั้นไม่ได้ทำงานตามภาพที่ 15



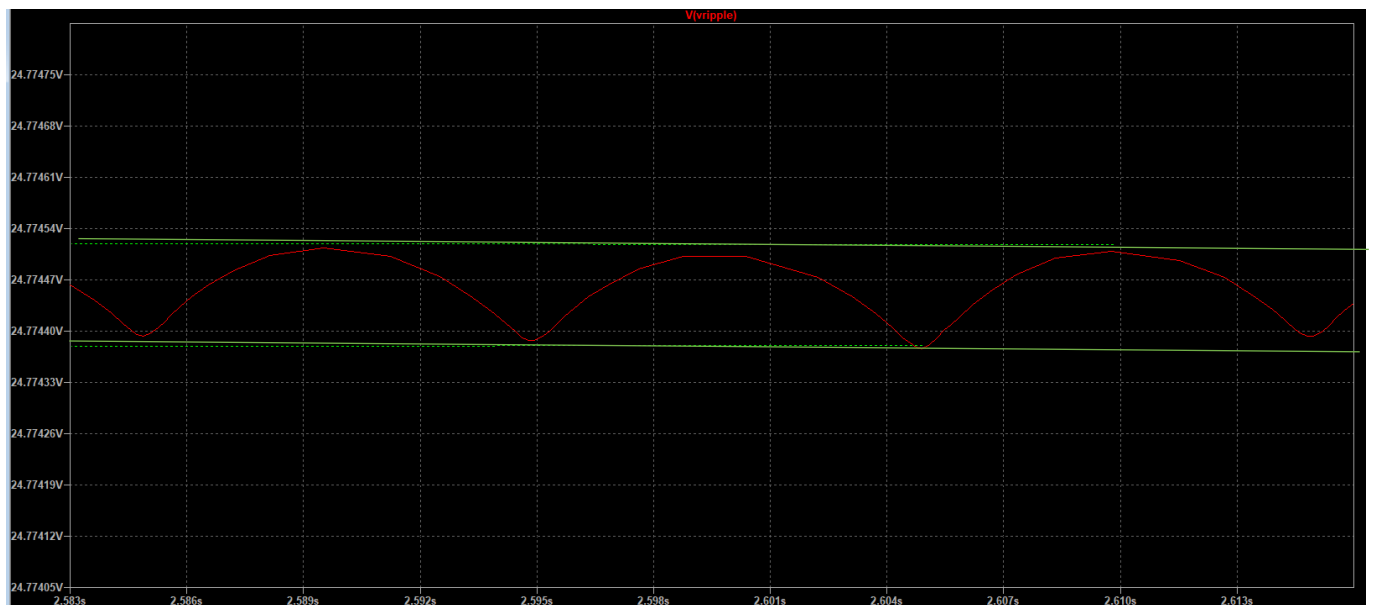
ภาพที่ 15 ภาพกราฟ Peak Inverse Voltage D1 and D2

กราฟแรงดันกระเพื่อมหลังจากผ่านวงจร filter

ภาพกราฟแรงดันกระเพื่อมนั้นจะให้ค่าที่ค่อนข้างตรงจากระดับสายตาปกติ นั่นคือประมาณ 24.77 V ตามภาพที่ 16 แต่เมื่อเราขยายภาพตามภาพที่ 17 จะพบว่าเราได้ $V_{\text{rpp}} = 0.14 \text{ mV}_{\text{pp}}$ ซึ่งน้อยกว่า $30 \text{ mV}_{\text{pp}}$



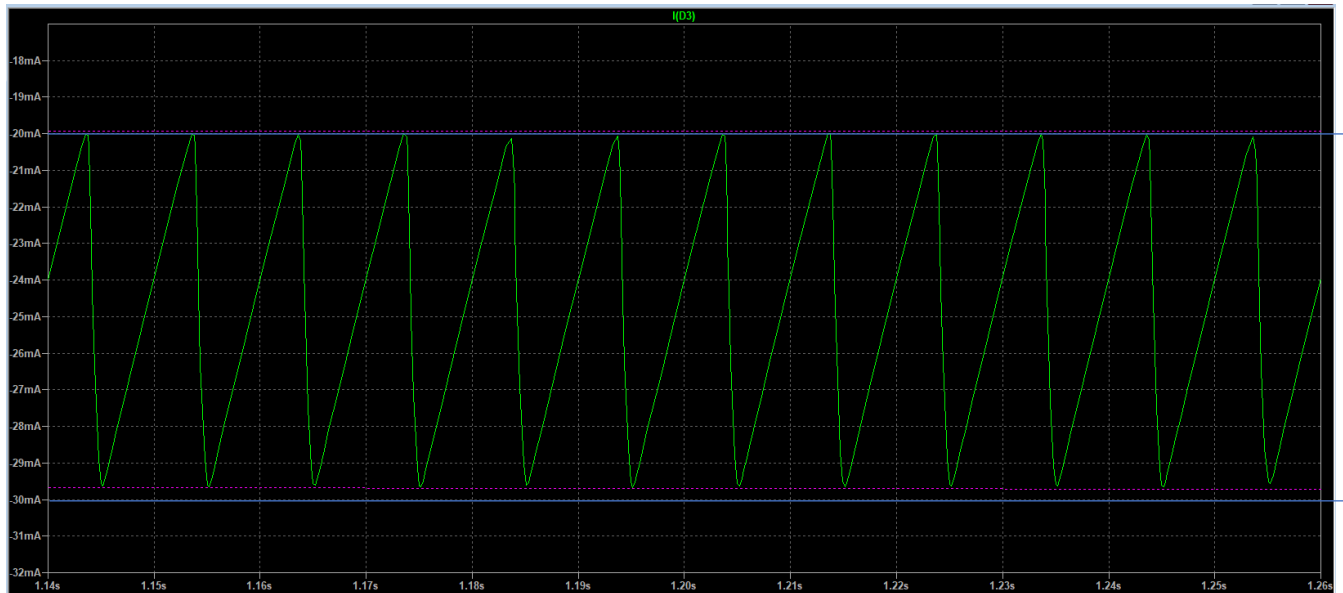
ภาพที่ 16 ภาพกราฟแรงดันกระเพื่อม



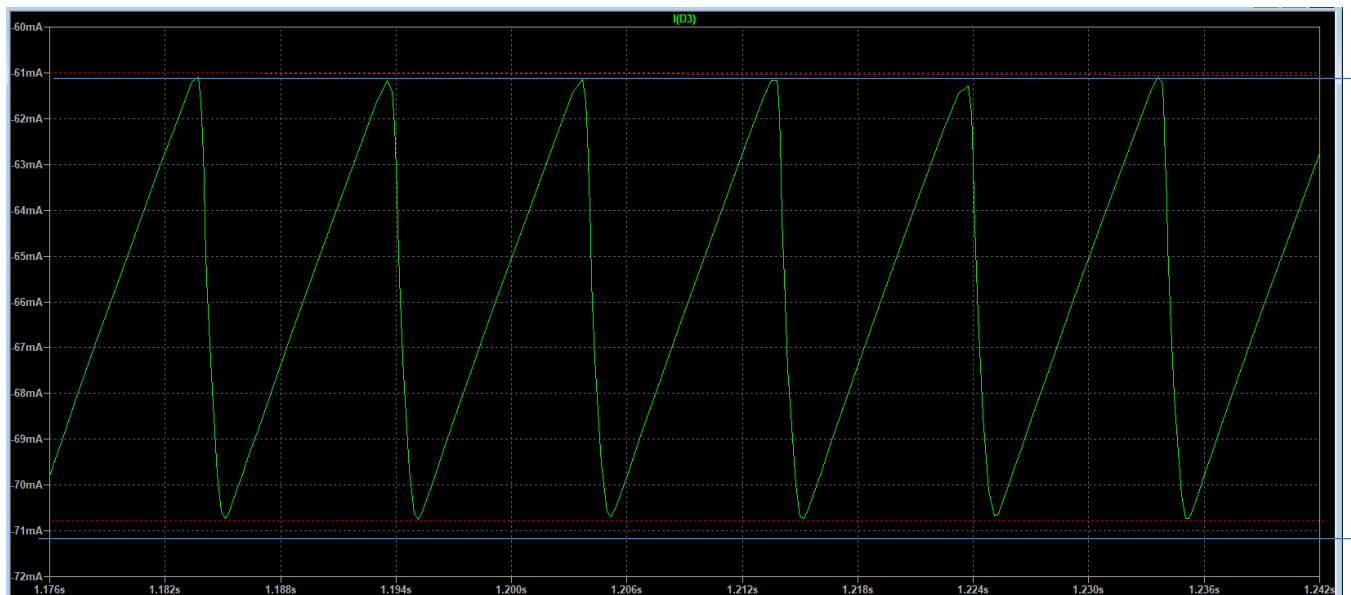
ภาพที่ 17 ภาพกราฟแรงดันกระเพื่อมเมื่อขยาย

กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน Zener Diode

จากภาพที่ 18 จะพบว่ากระแสที่ไหลผ่าน Zener diode ต่อโหลด $200\ \Omega$ จะมีกระแสเฉลี่ยที่ $-25\ \text{mA}$ และจากภาพที่ 19 จะพบว่ากระแสที่ไหลผ่าน Zener diode ต่อโหลด $700\ \Omega$ จะมีกระแสเฉลี่ยที่ $-66\ \text{mA}$ จะพบว่ากระแสไหลผ่าน Zener มากขึ้นเมื่อ โหลดที่ต่อขนานสูงขึ้น เพราะมีการแบ่งกระแส



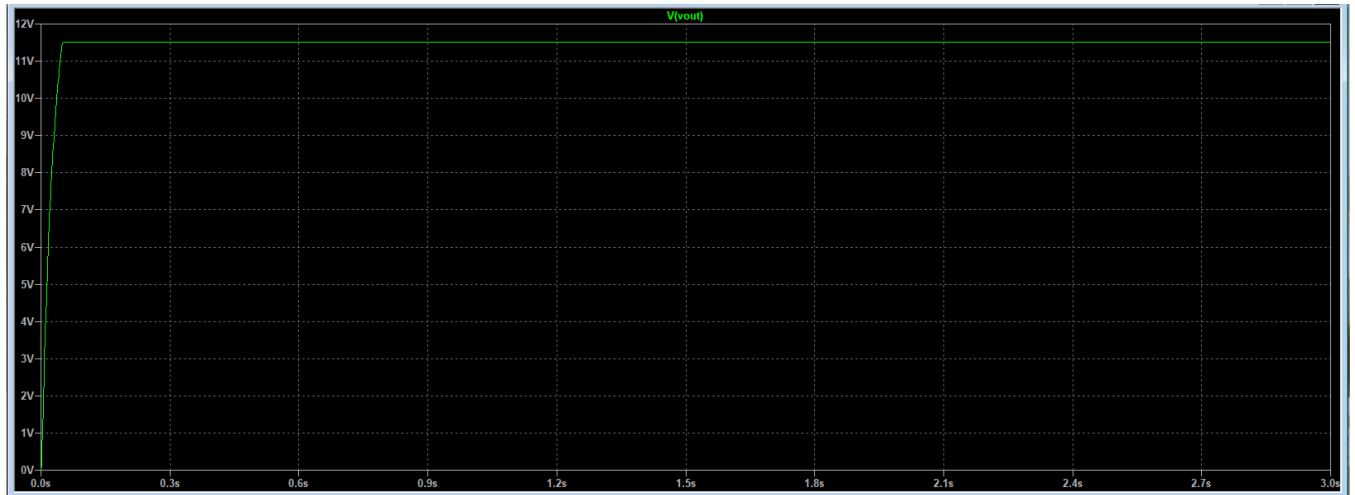
ภาพที่ 18 ภาพกราฟกระแสที่ไหลผ่าน Zener diode เมื่อโหลด $200\ \Omega$



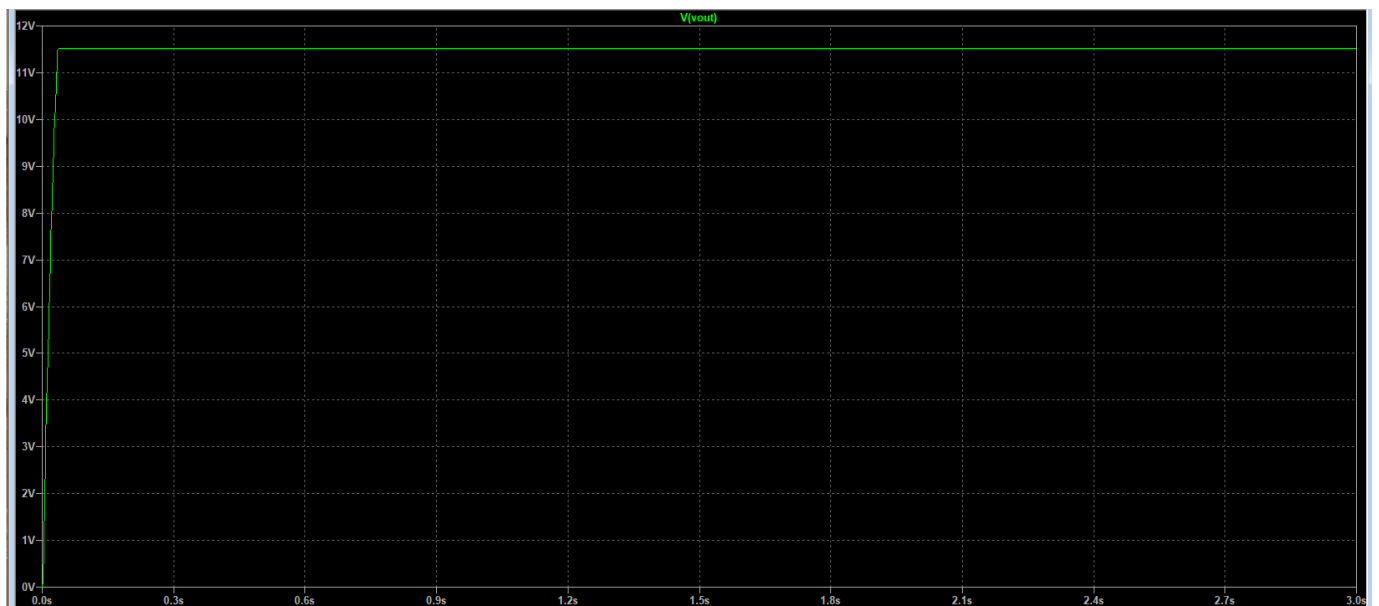
ภาพที่ 19 ภาพกราฟกระแสที่ไหลผ่าน Zener diode เมื่อโหลด $700\ \Omega$

กราฟสัญญาณที่ตำแหน่ง Output พร้อมแสดงค่าเฉลี่ย DC

กราฟที่ 20 และกราฟที่ 21 จะอยู่แทบจะตำแหน่งเดียวกัน และแรงดันนั้นอยู่ในช่วง 11-12 V

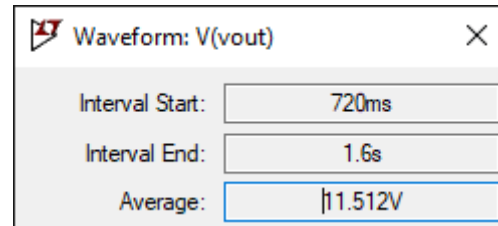
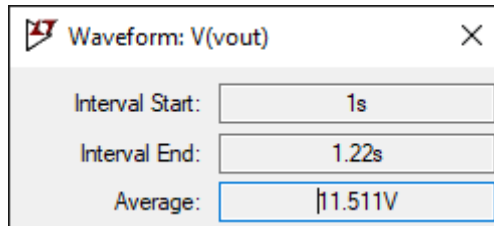


ภาพที่ 20 ภาพกราฟแรงดัน output เมื่อโหลด $200\ \Omega$



ภาพที่ 21 ภาพกราฟแรงดัน output เมื่อโหลด $700\ \Omega$

เมื่อเราดูค่าเฉลี่ย DC ของทั้งสองกราฟจะพบว่า ทั้งสองกราฟมีค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ใกล้เคียงกัน และอยู่ในช่วงเดียวกัน ดังภาพที่ 22 และ 23 นั่นคือ 11.51 V

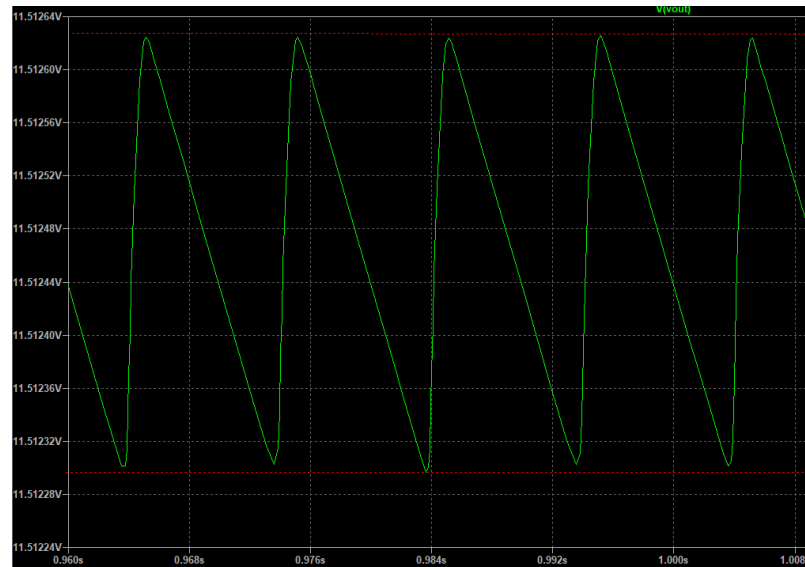
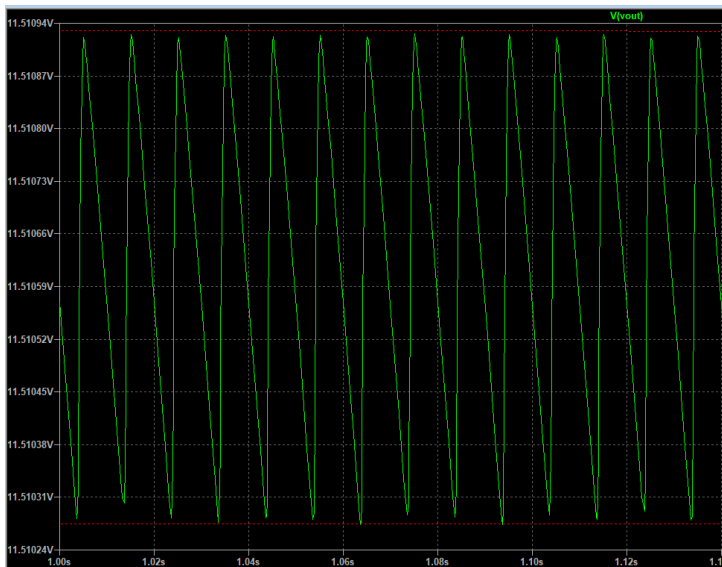


ภาพที่ 22 ภาพกราฟแรงดัน DC เมื่อโหลด 200 Ω

ภาพที่ 23 ภาพกราฟแรงดัน DC เมื่อโหลด 700 Ω

เมื่อเราสังเกตกราฟเข้าไปอีกจะพบว่ายังมีกระเพื่อมอยู่แต่ในระดับที่น้อยมากๆ ตามภาพที่ 24 และ ภาพที่ 25

เราจะพบว่า $V_{rpp} = 0.65 \text{ mV}_{pp}$ สำหรับ 200 Ω และพบว่า $V_{rpp} = 0.33 \text{ mV}_{pp}$ สำหรับ 700 Ω



ภาพที่ 24 ภาพกราฟแรงดันกระเพื่อม DC เมื่อโหลด 200 Ω

ภาพที่ 25 ภาพกราฟแรงดันกระเพื่อม DC เมื่อโหลด 700 Ω

ตอบคำถามในการออกแบบ

1. ทำไมวงจร Half-Wave Rectifier ไม่นิยมสร้าง DC Power Supply: เพราะว่าวงจรแบบนี้จะทำให้กราฟที่ได้ออกมาไม่ต่อเนื่องมาก และระยะห่างระหว่างพีคมากเกินไป เมื่อนำมากรองให้เป็นกระแสไฟตรงจะทำได้ยาก
2. Peak Inverse Voltage ของไดโอด มีความสำคัญอย่างไรในการออกแบบวงจร rectifiers: PIV สามารถใช้ในการบอกได้ว่าไดโอดจะสามารถทนแรงดันในทิศกลับได้มากแค่ไหน เพื่อที่จะใช้ในการดูว่าไดโอดที่เราจะนำไปใช้เหมาะสมกับขนาดแรงดันของวงจรนั้นๆหรือไม่
3. ในการออกแบบวงจร Rectifier ค่าแรงดันกระเพื่อมที่เอาต์พุตควรมีค่ามากหรือน้อย: Ripple Voltage ควรมีค่าน้อยๆเพราะเราต้องการไฟตรงที่ไม่มีการกระเพื่อมมาก ถ้ามีการกระเพื่อมมากเกินไปอาจส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ที่ใช้ไฟ DC ที่เรานำไปต่อด้วยได้
4. ประสิทธิภาพของตัวกรองมีนิยามอย่างไร และควรมีค่ามากหรือน้อยเพราะเหตุใด: ประสิทธิภาพตัวกรองหาได้จาก อัตราส่วนของแรงดันกระเพื่อมต่อแรงดัน DC และควรมีค่าน้อย กล่าวคือ แรงดันกระเพื่อมจะมีค่าน้อยตามไปด้วย ซึ่งเราต้องการให้แรงดันกระเพื่อมต่ำจากคำตอบข้อ 3
5. วงจร Regulator มีความสำคัญต่อวงจร DC Power Supply อย่างไร และไม่ใช้วงจร Regulator ในการออกแบบได้ไหม: วงจร Regulator ประกอบด้วย Zener diode มีหน้าที่แบ่งกระแสบางส่วน และกรองแรงดันให้ไม่เกินค่าที่ให้ผ่านได้ โดยถ้าเราไม่ใช้ Zener diode เราต้องมีการออกแบบ RC-pi filter และเพิ่มตัวต้านทานภายในอีกตัวเพื่อออกแบบวงจรให้กรองแรงดันให้ได้ตามที่ต้องการซึ่งจะยากขึ้นมาก และสามารถใช้ได้ในบางกรณีเท่านั้น แต่ถ้าเราใช้ transistor ในการคุมกระแสที่ไหลผ่าน จะสามารถทำได้ง่ายกว่า และได้รับความนิยมมากกว่า
6. จงอธิบายปัญหาที่เกิดขึ้นเมื่อนำวงจร DC Power Supply ที่ออกแบบไปใช้ในโหลดต่ำๆ และโหลดสูงๆ : ถ้าเราใช้โหลดที่ไม่พอดีกับโหลดที่อีกแบบมาให้ใช้ภายใน วงจร regulator จะมีปัญหาขึ้น จาก Zener diode โดยที่ การใช้โหลดต่ำๆ จะส่งผลให้แรงดันที่ออกมาจะมีค่าต่ำมากๆ และมีการกระเพื่อมที่สูง แต่ถ้าโหลดใหญ่มากๆจะส่งผลให้กระแสไม่ไหลไปจึงไม่เกิดปัญหาขึ้น จึงมีปัญหาคือโหลดต่ำเท่านั้น