

บทที่ 6

สรุปผลที่ได้จากการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยที่ได้คำนวณวิเคราะห์โดยการคำนวณทางคณิตศาสตร์และการทดลองของวงจรเอชโพลเปอร์สวิตช์ที่ความถี่สูงสามารถสรุปเป็นข้อๆ ได้ดังนี้

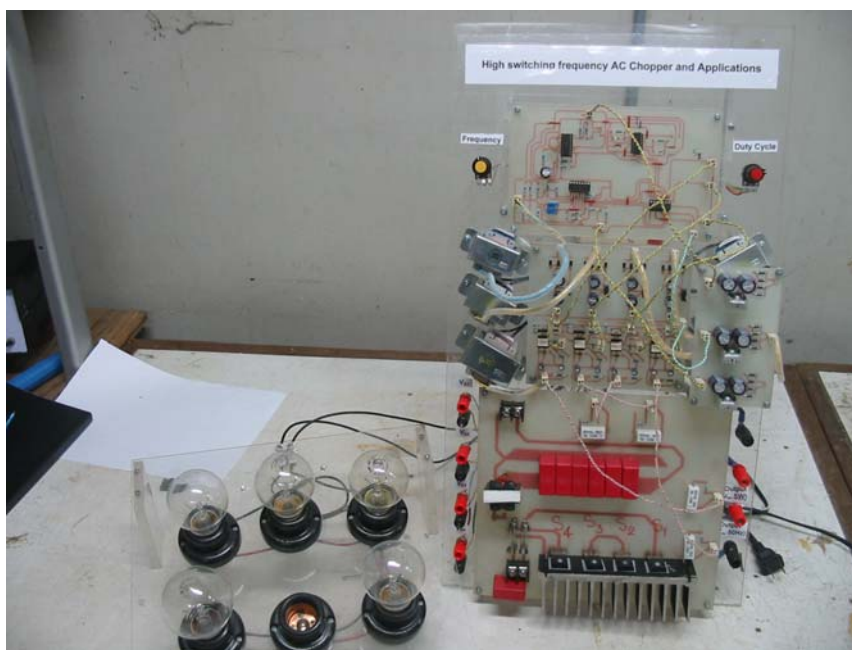
1. ได้ทำการศึกษาและสร้างเครื่องต้นแบบ เพื่อใช้ผลการทดลองจากเครื่องต้นแบบในการยืนยันเปรียบเทียบความถูกต้องกับผลการวิเคราะห์จากการคำนวณทางคณิตศาสตร์ โดยในการสร้างเครื่องต้นแบบทำให้สามารถเข้าใจการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ การทำงานของ IC ชนิดต่างๆ การต่อวงจร IC ใช้งานในรูปแบบต่างๆ เพื่อให้ได้สัญญาณที่ต้องการ รวมไปถึงการนำสัญญาณที่ได้จากการต่อ IC ชนิดต่างๆ มาใช้ในการควบคุมอุปกรณ์สวิตช์ที่ใช้ ทำให้ได้รู้ถึงหลักการทำงานของวงจรที่นำเสนอได้อย่างแท้จริงและสามารถนำความรู้ที่ได้จากการสร้างเครื่องต้นแบบเพื่อใช้ในการวิจัยนี้ไปพัฒนาต่อยอดเพื่ออุปกรณ์ใช้งานในรูปแบบอื่นๆ ได้

2. จากการศึกษาถึงการทำงานของวงจรเอชโพลเปอร์ที่ได้นี้ทำให้เข้าใจถึงลักษณะคลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตว่ามีฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงปะปนออกมาด้วยแต่สามารถทำให้คลื่นฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงถูกกำจัดออกไปได้โดยใช้วงจร LC ฟิลเตอร์ ซึ่ง LC ฟิลเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะมีขนาดเล็กและสามารถกรองทั้งฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงตั้งแต่ 20 kHz ขึ้นไปเพื่อไม่ให้ออกมาทางด้านเอาต์พุต ในขณะที่เดียวกันก็จะให้แรงดันความถี่ต่ำ 50Hz ผ่านไปได้เกือบทั้งหมด โดยในงานวิจัยนี้ก็ได้แสดงให้เห็นถึงหลักการทำงานของวงจร LC ฟิลเตอร์ไว้อย่างละเอียด

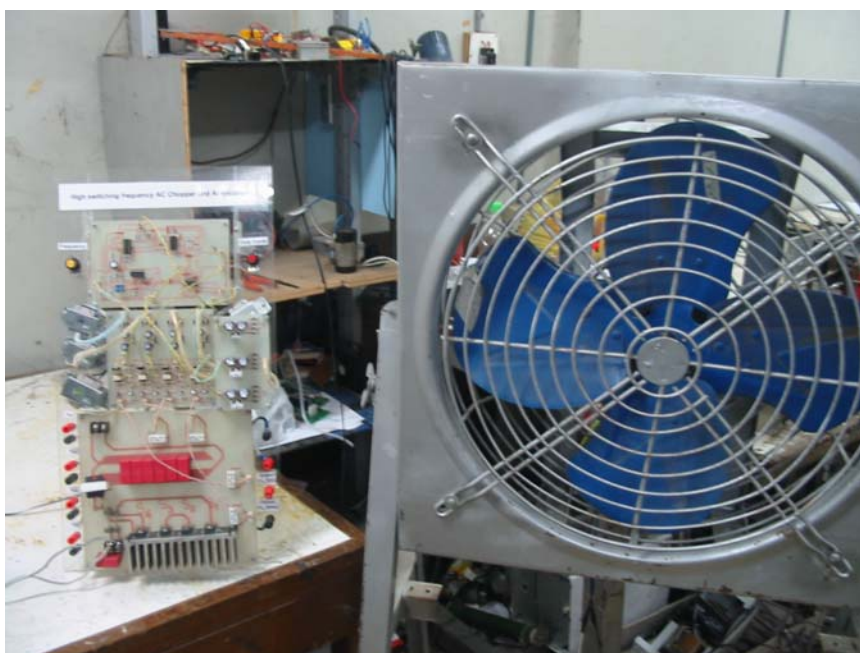
3. จากการทำงานของวงจรเอชโพลเปอร์ที่นำเสนอนี้ทำให้เข้าใจว่าวงจรเอชโพลเปอร์ไม่สามารถทำงานได้เพียงลำพังแต่จะต้องมีอุปกรณ์ช่วยเสริมเพื่อให้สามารถทำงานได้ตามที่ต้องการ โดยต่อเพิ่มวงจร RC สแน็บเบอร์ เพื่อช่วยลดทอนระดับแรงดันสไปค์ในจังหวะที่มีการ OFF มิฉะนั้นแรงดันสไปค์ดังกล่าวอาจทำให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์สวิตช์เนื่องจากทำงานที่ระดับแรงดันเกินพิกัด ดังนั้นวงจรสแน็บเบอร์จึงเป็นอุปกรณ์ช่วยที่สำคัญที่จะขาดเสียมิได้ในวงจรเอชโพลเปอร์ นอกจากนี้ได้ทำการวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรเอชโพลเปอร์ที่มีวงจรสแน็บเบอร์ต่อร่วมด้วยอย่างละเอียดโดยได้แสดงการทำงานในแต่ละช่วงของการสวิตช์ ในขณะการเก็บประจุและ การคายประจุของ C ทั้งโดยการจำลองและทำการทดลองเปรียบเทียบผลซึ่งกันและกันเพื่อยืนยันความเข้าใจในทางทฤษฎีควบคู่กับทางปฏิบัติ

4. สามารถสร้างแรงดันคลื่นไซน์ 50 Hz ที่ถูกสับในลักษณะเป็นพัลส์ความถี่สูงในระดับ 20 kHz โดยพัลส์ความถี่สูง 20 kHz ที่ได้นี้สามารถปรับค่าดีวีไอเคิลได้จาก 10%-90% เพื่อปรับค่า (rms) ของแรงดันของเอาต์พุต โดยแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากวงจรเอชโพลเปอร์นี้จะถูกนำไปผ่านวงจร LC ฟิลเตอร์ เพื่อกรองให้ได้ คลื่นไซน์ 50 Hz ที่สามารถปรับควบคุมแรงดันได้ในย่าน 0-200V

โดยแรงดันควบคุมที่ได้นี้มีประโยชน์ในการนำไปประกอบเป็นชุดเครื่องรักษาระดับแรงดัน หรือนำไปใช้เป็นชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์เฟสเดียวตลอดจนนำไปใช้เป็นชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ใช้กับโหลดที่เป็นขดลวดความร้อน (Heater)



รูปที่ 6.1 ชุดทดลองของวงจรเอชไอโอพีเออร์ที่จ่ายโหลดหลอดไฟ 500 วัตต์



รูปที่ 6.2 ชุดทดลองของวงจรเอชไอโอพีเออร์ที่จ่ายโหลดมอเตอร์พัดลมขนาด 1/4 แรงม้า

เอกสารอ้างอิง

- [1] J.-H. Kim and B.-H. Kwon **“Three-phase ideal phifter using AC choppers”** IEE Proc.- Electr. Power Appl., Vol. 147, No. 4, July 2000, pp. 329-335.
- [2] Yo Hongxiang, Lin Min and Ji Yanchao **“An Advanced Harmonic Elimination PWM Technique for AC Choppers”** IEEE Power Electronics Specialists Confererce., Aachen, Germany, Vlo.1, 20-25 June 2004, pp. 161-165.
- [3] N.A. Ahmed, K.Amei, M. Sakui,Membre,IEEE **“A new configuration of single-phase symmetrical PWM AC chopper voltage controller”** IEEE Transactions on Industral Electrnics, Vol 46 No. 5, October 1999,pp. 943-952
- [4] N. Abd El-Latif Ahmed, K.Amei, M. Sakui, **“Improved circuit of AC choppers for single-phase systems”** PCC Nagaoka 1997 , pp. 907-912
- [5] H. Bodur, A.F.Bakan, M.H.Sarul, **“Universal motor Speed control with current Controlled PWM AC chopper by using a microcontroller ”** IEEE Vol 1, 19-20 Jan 2000 ,pp. 394-398
- [6] M.E. Balci, M.H. Hocaoglu, **“ Effects of Source Voltage Harmonic Distortion on Power Factor Compensation in Triac Controlled AC Chopper Circuits”** Power Electronics and Drives Systems, 2005. PEDS 2005. International Conference on Vol 2, Issue ,28-01 Nov. 2005 ,pp1199 – 1204
- [7] G.-H. Choe , A.K . Wallace , M.-H .Park , **“An Improved PWM technique for AC choppers ”** Power Electronics, IEEE Transactions on Vol 4, Issue 4, Oct. 1989 ,pp496 – 505
- [8] J.-H. Kim , B.-D. Min.And B.-H. Kwon **“Novel topologies of AC choppers”** Etectric Power Applications, IEE Proceedings. IEE Proceedings Vol.143, Issue 4, July 1996 Page(s) : 323-330
- [9] J.-H. Kim , B.-D. Min., B.-H. Kwon and Won **“A PWM buck-boost AC chopper solving the commutation problem”** Industrial Electronics, IEEE Transactions on Volume 45, Issue 5, Oct. 1998 Page(s):832 - 835
- [10] Do-Hyun Jang; Gyu-Ha Choe; Ehsami, **“Asymmetrical PWM technique with harmonic elimination and power factor control in AC choppers”** Power Electronics, IEEE Transactions on Volume 10, Issue 2, March 1995 Page(s):175 - 184

ภาคผนวก

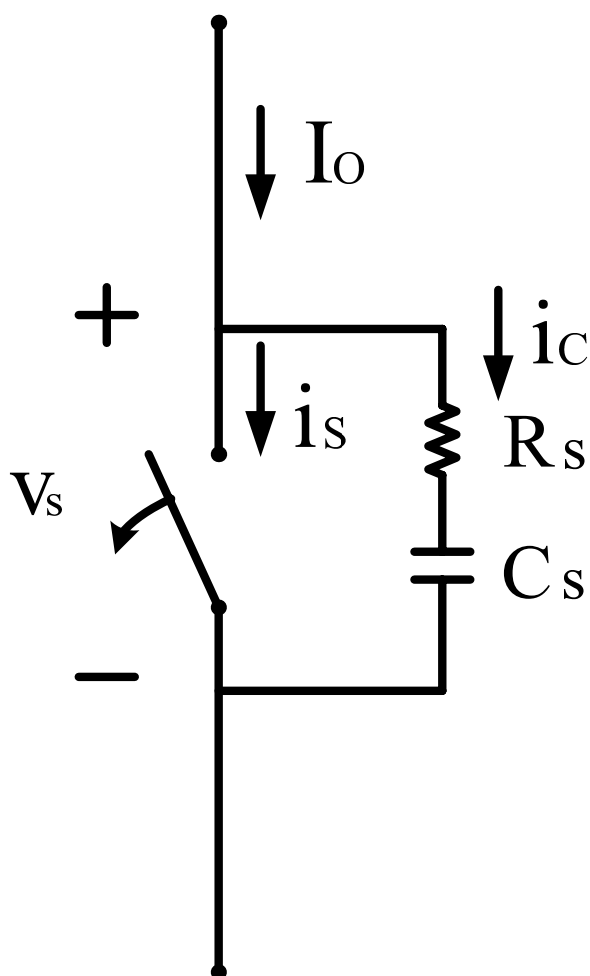
ภาคผนวก ก.

ผลงานเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์

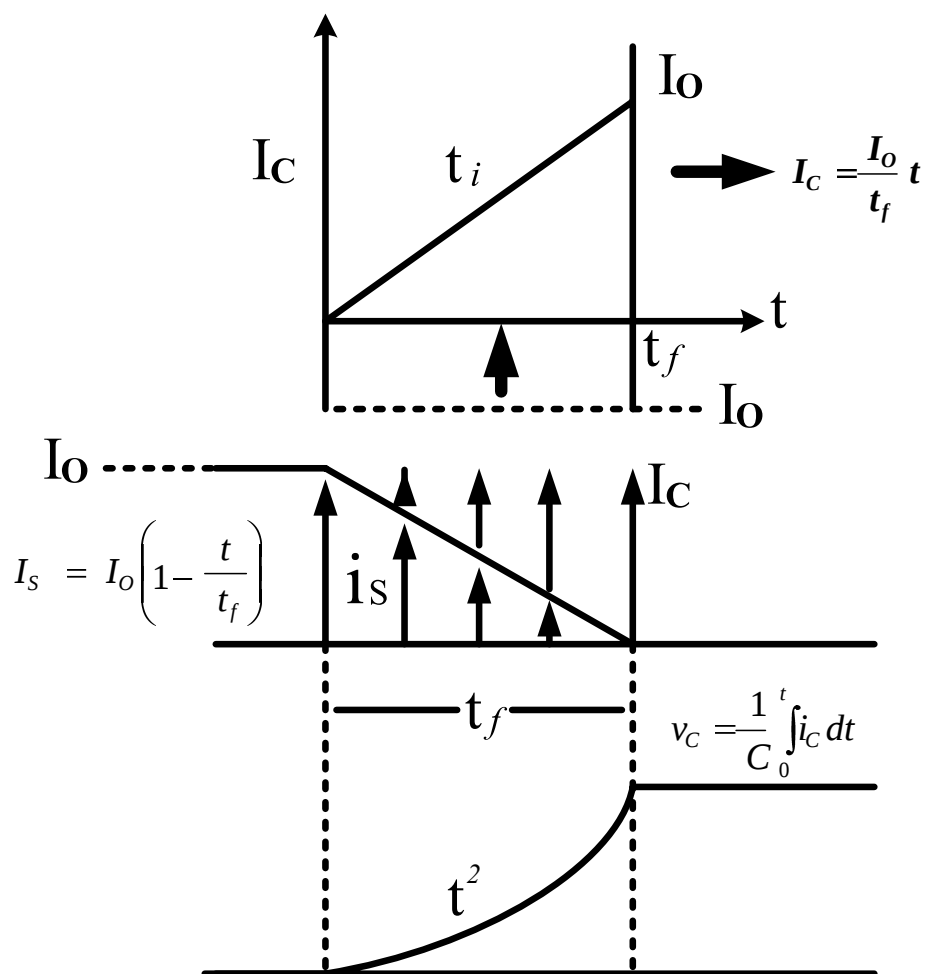
นายณัฐวุฒิ พลชะดิน และ วิริยะ พิเชฐจำเริญ “การวิเคราะห์และออกแบบแหล่งจ่าย
แรงดันเอซีปรับค่าได้แบบสแตติก” วิศวสารลาดกระบัง Ladkrabang Engineering Journal
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ตีพิมพ์ในปีที่ 24
ฉบับที่ 1 เดือนมีนาคม 2550

ภาคผนวก - ข

ข-1 แสดงการแบ่งกระแสระหว่างสวิตช์ กับคาปาซิเตอร์และขั้นตอนการ
คำนวณหาที่มาของสมการหาค่าคาปาซิเตอร์ของสแน็บเบอร์



รูปที่ ข.1 การไหลของการแสที่สวิตช์



รูปที่ ข.2 การแบ่งกระแส I_o เป็น I_s และ I_c

ที่มาของ C_s

$$v_c = \frac{1}{C_0} \int_0^t i_c dt$$

$$v_c = \frac{1}{C_s} \int_0^t i_c dt$$

$$v_c = \frac{1}{C_s} \int_0^{t_f} I_o \frac{t}{t_f} dt$$

$$v_s = \frac{1}{C_s} \int_0^{t_f} i_c dt$$

$$v_s = \frac{1}{C_s} \int_0^{t_f} i_c dt$$

$$v_s = \frac{1}{C_s} \int_0^{t_f} I_o \frac{t}{t_f} dt \quad \text{จาก} \quad I_C = \frac{I_o}{t_f} t$$

ทำการแทนค่าเวลา

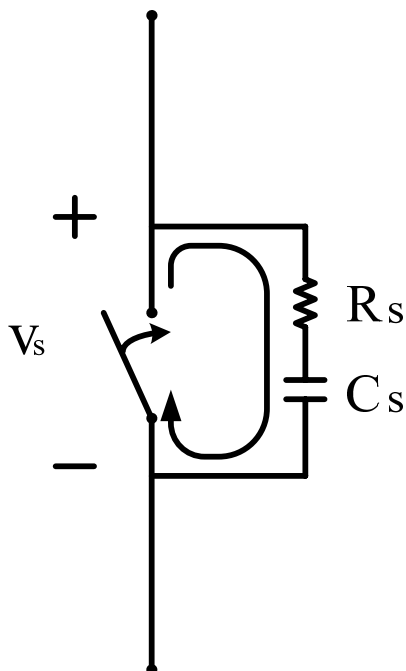
$$v_s = \frac{I_o t_f^2}{2C_s t_f} \Big|_0^{t_f}$$

$$v_s = \frac{I_o t_f^2}{2C_s t_f}$$

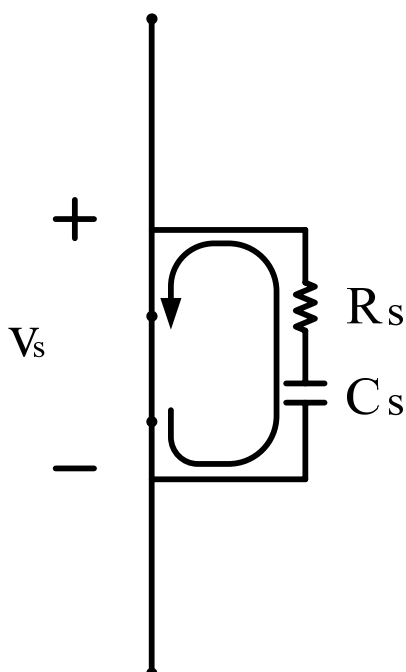
จะได้สมการ C_s ดังนี้

$$C_s = \frac{I_o t_f}{2v_s}$$

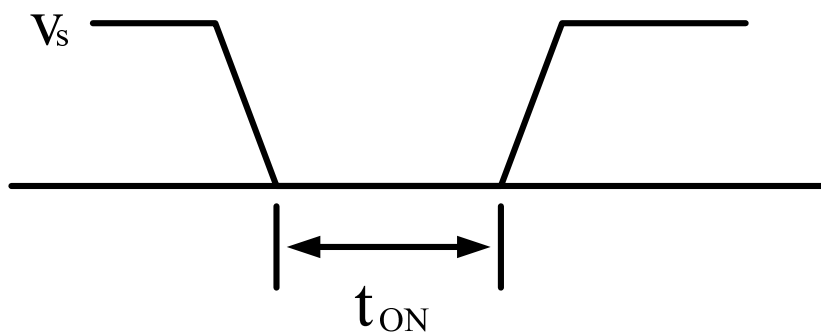
ข-2 แสดงการชาร์ตประจุของคาปาซิเตอร์และการคายประจุของคาปาซิเตอร์
ผ่านตัวต้านทานในจังหวะที่สวิตช์ทำการตัดต่อวงจร



รูปที่ ข.3 การชาร์ตประจุของ C_s ผ่าน R_s ขณะที่สวิตช์ตัดวงจร



รูปที่ ข.4 การคายประจุของ C_s ผ่าน R_s ขณะที่สวิตช์ต่อวงจร



รูปที่ ข.5 ช่วงเวลาที่สวิตช์ต้องวงจร

รูปแบบความสัมพันธ์ ของ เวลาในการทำงานของสวิตช์กับ RC สนับเบอร์

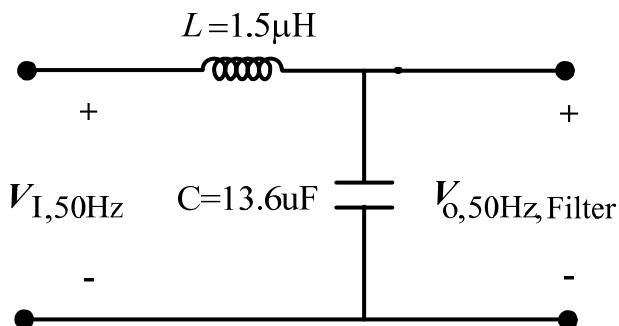
$$t_{ON} > 5R_sC_s$$

$$R_s < \frac{t_{ON}}{5C_s}$$

ภาคผนวก –ค

ค-1แสดงการคำนวณการแบ่งแรงดันของวงจร LC ฟิเตอร์กรณีไม่มีโหลดทางด้านเอาต์พุต

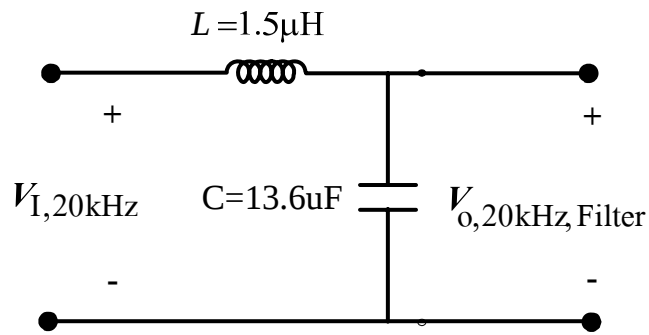
ค-1.1กรณีที่ไม่มีโหลดทางด้านเอาต์พุตที่ความถี่ต่ำ 50Hz และความถี่สูง 20kHz



รูปที่ ค.1 วงจร LC ฟิเตอร์กรณีที่ไม่มีโหลดทางด้านเอาต์พุตที่ความถี่ต่ำ 50 Hz

จากรูปที่ ค.1สามารถคำนวณหาแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่ความถี่ต่ำ 50 Hz ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 V_{O,50Hz,Filter} &= \left[\frac{1}{\omega C} / \left(\frac{1}{\omega C} + \omega L \right) \right] V_{I,50Hz} \\
 &= \left[\left(\frac{1}{2 \times \pi \times f \times C} \right) / \left(\left(\frac{1}{2 \times \pi \times f \times C} \right) + (2 \times \pi \times f \times L) \right) \right] V_{I,50Hz} \\
 &= \left[\left(\frac{1}{2 \times 3.14 \times 50 \times 14 \times 10^{-6}} \right) / \left(\left(\frac{1}{2 \times 3.14 \times 50 \times 14 \times 10^{-6}} \right) + \left(\frac{1}{2 \times 3.14 \times 50 \times 1.8 \times 10^{-3}} \right) \right) \right] V_{I,50Hz} \\
 &= [(227.47)/(227.47 + 0.56.5)] \times 110 \text{ V} \\
 &= 109.72 \text{ V}
 \end{aligned}$$



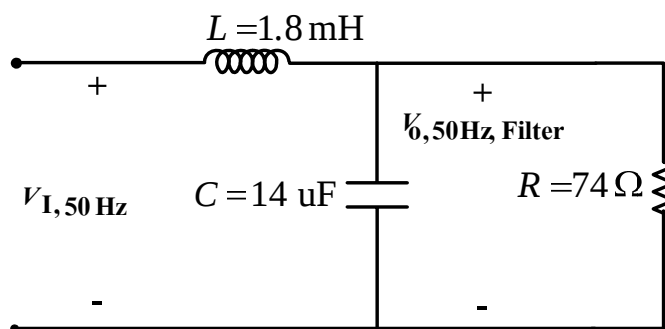
รูปที่ ค.2 วงจร LC ฟิเตอร์กรณีที่ไม่มีโหลดทางด้านเอาต์พุตที่ความถี่สูง 20 kHz

จากรูปที่ ค.1 สามารถคำนวณหาแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่ความถี่สูง 20 kHz ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 V_{O,20kHz,Filter} &= \left[\frac{1}{\omega C} / \left(\frac{1}{\omega C} + \omega L \right) \right] V_{I,20kHz} \\
 &= \left[\left(\frac{1}{2 \times \pi \times f \times C} \right) / \left(\left(\frac{1}{2 \times \pi \times f \times C} \right) + (2 \times \pi \times f \times L) \right) \right] V_{I,20kHz} \\
 &= \left[\left(\frac{1}{2 \times 3.14 \times 20000 \times 14 \times 10^{-6}} \right) / \left(\left(\frac{1}{2 \times 3.14 \times 20000 \times 14 \times 10^{-6}} \right) + \left(\frac{1}{2 \times 3.14 \times 20000 \times 1.8 \times 10^{-3}} \right) \right) \right] V_{I,50Hz} \\
 &= [(0.568) / (0.568 + 226.08)] \times 70 \text{ V} \\
 &= 0.175 \text{ V}
 \end{aligned}$$

ค-2 แสดงการคำนวณการแบ่งแรงดันของวงจร LC ฟิเตอร์กรณีสมีโหลด ทางด้านเอาต์พุตเป็นโหลด R

ค-2.1 กรณีสมีโหลดทางด้านเอาต์พุตเป็นโหลด R ที่ความถี่ต่ำ 50Hz และความถี่สูง 20kHz



รูปที่ ค.3 วงจร LC ฟิเตอร์กรณีสมีโหลดทางด้านเอาต์พุตเป็นโหลด R ที่ความถี่ต่ำ 50 Hz

จากรูปที่ ค.3 สามารถคำนวณหาแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่ความถี่ต่ำ 50 Hz ได้ดังนี้

หาค่า Z_{RC}

$$Z_{RC} = \frac{R \times (-jXC)}{R + (-jXC)}$$

$$= \left[\frac{R \times \left(-j \frac{1}{2 \times \pi \times f \times C} \right)}{R + \left(-j \frac{1}{2 \times \pi \times f \times C} \right)} \right]$$

$$= \left[\frac{74 \times \left(-j \frac{1}{2 \times 3.14 \times 50 \times 14 \times 10^{-6}} \right)}{74 + \left(-j \frac{1}{2 \times 3.14 \times 50 \times 14 \times 10^{-6}} \right)} \right]$$

$$= \left[\frac{74 \times (-j227.47)}{74 + (-j227.47)} \right]$$

$$= 70.37 \angle -18.03^\circ \quad \text{หรือ} \quad = 66.91 - j21.78$$

หาค่า Z_{RCL}

$$Z = Z_{RCL} + jXL$$

$$= (66.91 - j21.78) + (j2 \times \pi \times f \times L)$$

$$= (66.91 - j21.78) + (j2 \times 3.14 \times 50 \times 1.8 \times 10^{-3})$$

$$= 66.91 - j16.128 \quad \text{หรือ} \quad = 68.83 \angle -13.55^\circ$$

หากระแสของวงจรได้จาก

$$I_{RCL} = \frac{V_{I,50Hz}}{Z_{RCL}}$$

$$= \frac{110 \angle 0^\circ}{68.8 \angle -17.16^\circ}$$

$$= 1.55 \angle 13.55^\circ$$

จากกระแส I_{RCL} สามารถหาแรงดันที่เอาต์พุตได้จาก

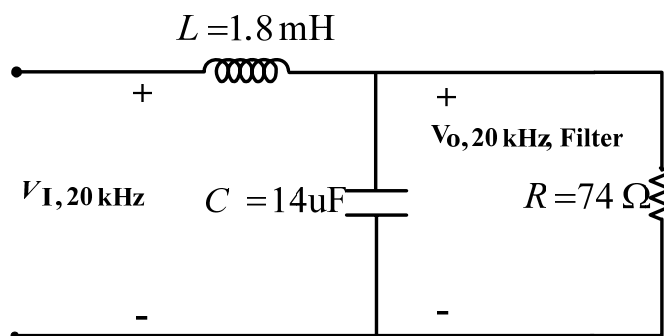
$$V_{O,50H} = I_{RCL} \times Z_{RC}$$

$$= 1.55 \angle 13.55^\circ \times 70.37 \angle -18.03^\circ$$

$$= 109.073 \angle -4.48^\circ$$

แรงดันความถี่ต่ำ 50 Hz ที่ผ่าน LC ฟิเตอร์จะได้เท่ากับ

$$V_{O,50Hz} = 109.275 \angle -0.38^\circ$$



รูปที่ ค.4 วงจร LC ฟิเตอร์กรณที่มีโหลดทางด้านเอาต์พุตเป็น โหลด R ที่ความถี่สูง 20 kHz

จากรูปที่ ค.4 สามารถคำนวณหาแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่ความถี่สูง 20 kHz ได้ดังนี้

หาค่า Z_{RC}

$$Z_{RC} = \frac{R \times (-jXC)}{R + (-jXC)}$$

$$= \left[\frac{R \times \left(-j \frac{1}{2 \times \pi \times f \times C} \right)}{R + \left(-j \frac{1}{2 \times \pi \times f \times C} \right)} \right]$$

$$= \left[\frac{74 \times \left(-j \frac{1}{2 \times 3.14 \times 20000 \times 13.6 \times 10^{-6}} \right)}{74 + \left(-j \frac{1}{2 \times 3.14 \times 20000 \times 13.6 \times 10^{-6}} \right)} \right]$$

$$= \left[\frac{74 \times (-j0.568)}{74 + (-j0.568)} \right]$$

$$= 0.567 \angle -89.57^\circ \quad \text{หรือ} \quad = 4.2 \times 10^{-3} - j0.566$$

หาค่า Z_{RCL}

$$Z = Z_{RCL} + jXL$$

$$= (4.2 \times 10^{-3} - j0.566) + (j2 \times \pi \times f \times L)$$

$$= (4.2 \times 10^{-3} - j0.566) + (j2 \times 3.14 \times 20000 \times 1.8 \times 10^{-3})$$

$$= 4.25 \times 10^{-3} + j225.514 \quad \text{หรือ} \quad = 225.514 \angle 89.99^\circ$$

หากระแสของวงจรได้จาก

$$\begin{aligned} I_{RCL} &= \frac{V_{I,20kHz}}{Z_{RCL}} \\ &= \frac{70 \angle 0^\circ}{225.514 \angle 89.99^\circ} \\ &= 0.310 \angle -89.99^\circ \end{aligned}$$

จากกระแส I_{RCL} สามารถหาแรงดันที่เอาต์พุตได้จาก

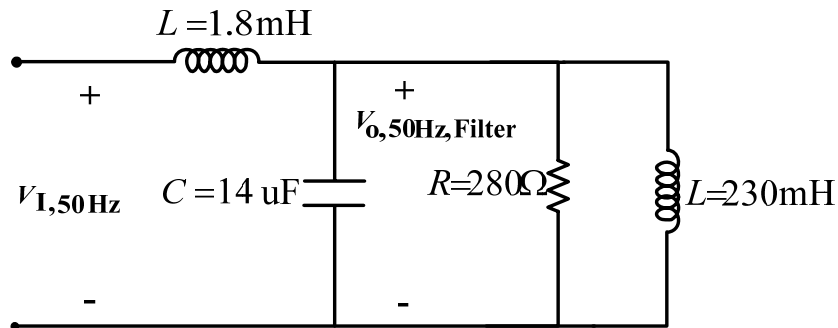
$$\begin{aligned} V_{O,20kHz} &= I_{RCL} \times Z_{RC} \\ &= 0.310 \angle -89.99^\circ \times 0.567 \angle -89.57^\circ \\ &= 0.175 \angle -179.56^\circ \end{aligned}$$

แรงดันความถี่สูง 20 kHz ที่ผ่าน LC ฟิเตอร์จะได้เท่ากับ $V_{O,20kHz} = 0.175 \angle -179.56^\circ$

ค-3แสดงการคำนวณการแบ่งแรงดันของวงจร LC ฟิเตอร์กรณีมีโหลด

ทางด้านเอาต์พุตเป็นโหลด RL

ค-2.1กรณีที่มีโหลดทางด้านเอาต์พุตเป็นโหลด RL ที่ความถี่ต่ำ 50Hz และความถี่สูง 20kHz



รูปที่ ค.5 วงจร LC ฟیلเตอร์กรณีที่มีโหลดทางด้านเอาต์พุตเป็นโหลด RL ที่ความถี่ต่ำ 50 Hz

จากรูปที่ ค.3 สามารถคำนวณหาแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่ความถี่ต่ำ 50 Hz ได้ดังนี้

หาค่า Z_{LR}

$$\begin{aligned}
 Z_{LR} &= \frac{R \times (jXL_o)}{R + (jXL_o)} \\
 &= \left[\frac{R \times (j2 \times \pi \times f \times L_o)}{R + (j2 \times \pi \times f \times L_o)} \right] \\
 &= \left[\frac{280 \times (j2 \times 3.14 \times 50 \times 230 \times 10^{-3})}{280 + (j2 \times 3.14 \times 50 \times 230 \times 10^{-3})} \right] \\
 &= \frac{20221.6 \angle 90^\circ}{289.16 \angle 14.46^\circ} \\
 &= 69.93 \angle 75.54^\circ \quad \text{หรือ} \quad = 197.46 + j67.714
 \end{aligned}$$

หาค่า Z_{LRC}

$$\begin{aligned}
 Z_{LRC} &= \frac{(Z_{LR}) \times (-jXC)}{(Z_{LR}) + (-jXC)} \\
 Z_{LRC} &= \frac{(Z_{LR}) \times (-jXC)}{(Z_{LR}) + (-jXC)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{(69.93 \angle 75.54^\circ) \times \left(-j \frac{1}{2 \times \pi \times f \times C} \right)}{(69.93 \angle 75.57^\circ) + \left(-j \frac{1}{2 \times \pi \times f \times C} \right)} \\
&= \frac{(69.93 \angle 75.54^\circ) \times \left(-j \frac{1}{2 \times 3.14 \times 50 \times 14 \times 10^{-6}} \right)}{(69.93 \angle 75.54^\circ) + \left(-j \frac{1}{2 \times 3.14 \times 50 \times 14 \times 10^{-6}} \right)} \\
&= \frac{15906.97 \angle -14.46^\circ}{160.707 \angle -83.76^\circ} \\
&= 98.98 \angle 69.3^\circ \quad \text{หรือ} \quad = 34.48 + j92.59
\end{aligned}$$

หาค่า Z_{LRCL}

$$\begin{aligned}
Z &= Z_{LRC} + jXL \\
&= (34.98 + j92.59) + (j2 \times \pi \times f \times L) \\
&= (34.98 + j92.59) + (j2 \times 3.14 \times 50 \times 1.8 \times 10^{-3}) \\
&= 34.98 + j93.15 \quad \text{หรือ} \quad = 99.50 \angle 69.41^\circ
\end{aligned}$$

หากระแสของวงจรได้จาก

$$\begin{aligned}
I_{LRCL} &= \frac{V_{I,50Hz}}{Z_{LRCL}} \\
&= \frac{110 \angle 0^\circ}{99.50 \angle 69.41^\circ} \\
&= 1.105 \angle -69.41^\circ
\end{aligned}$$

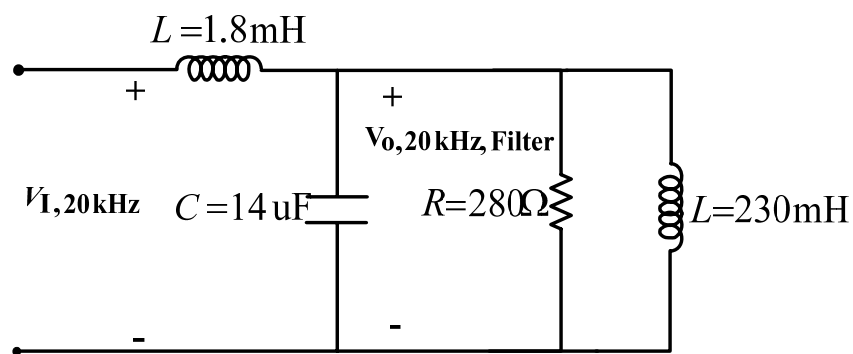
จากกระแส I_{LRCL} สามารถหาแรงดันที่เอาต์พุตได้จาก

$$V_{O,50H} = I_{LRCL} \times Z_{LRC}$$

$$= 1.105 \angle -69.41^\circ \times 98.98 \angle 69.3^\circ$$

$$= 109.42 \angle -138.7^\circ$$

แรงดันความถี่ต่ำ 50 Hz ที่ผ่าน LC ฟิเตอร์จะได้เท่ากับ $= 109.42 \angle -138.7^\circ$



รูปที่ ค.6 วงจร LC ฟิเตอร์กรณีที่มีโหลดทางด้านเอาต์พุตเป็น โหลด RL ที่ความถี่สูง 20 kHz

$$Z_{LR} = \frac{R \times (jXL_o)}{R + (jXL_o)}$$

$$= \left[\frac{R \times (j2 \times \pi \times f \times L_o)}{R + (j2 \times \pi \times f \times L_o)} \right]$$

$$= \left[\frac{280 \times (j2 \times 3.14 \times 50 \times 230 \times 10^{-3})}{280 + (j2 \times 3.14 \times 50 \times 230 \times 10^{-3})} \right]$$

$$= \frac{20221.6 \angle 90^\circ}{289.16 \angle 14.46^\circ}$$

$$= 64.93 \angle 75.54^\circ \quad \text{หรือ} \quad = 17.46 - j67.714$$

หาค่า Z_{LRC}

$$\begin{aligned}
 Z_{LRC} &= \frac{(Z_{LR}) \times (-jXC)}{(Z_{LR}) + (-jXC)} \\
 &= \frac{(69.93 \angle 75.54^\circ) \times \left(-j \frac{1}{2 \times \pi \times f \times C} \right)}{(69.93 \angle 75.54^\circ) + \left(-j \frac{1}{2 \times \pi \times f \times C} \right)} \\
 &= \frac{(69.93 \angle 75.54^\circ) \times \left(-j \frac{1}{2 \times 3.14 \times 20000 \times 14 \times 10^{-6}} \right)}{(69.93 \angle 75.54^\circ) + \left(-j \frac{1}{2 \times 3.14 \times 20000 \times 14 \times 10^{-6}} \right)} \\
 &= \frac{39.16 \angle -14.46^\circ}{69.38 \angle 75.42^\circ} \\
 &= 0.564 \angle -89.88^\circ \quad \text{หรือ} \quad = 0.00118 + j0.563
 \end{aligned}$$

หาค่า Z_{LRCL}

$$\begin{aligned}
 Z &= Z_{LRC} + jXL \\
 &= (0.00118 - j0.563) + (j2 \times \pi \times f \times L) \\
 &= (0.00118 - j0.563) + (j2 \times 3.14 \times 20000 \times 1.8 \times 10^{-3}) \\
 &= 0.00118 + j225.517 \quad \text{หรือ} \quad = 225.51 \angle 89.99^\circ
 \end{aligned}$$

หากระแสของวงจรได้จาก

$$\begin{aligned}
 I_{LRCL} &= \frac{V_{I, 20\text{kHz}}}{Z_{LRCL}} \\
 &= \frac{70 \angle 0^\circ}{225.51 \angle 89.99^\circ}
 \end{aligned}$$

$$= 0.310 \angle -89.99^\circ$$

จากกระแส I_{LRCL} สามารถหาแรงดันที่เอาต์พุตได้จาก

$$V_{O,20kHz} = I_{LRCL} \times Z_{LRC}$$

$$= 0.310 \angle -89.99^\circ \times 0.564 \angle -89.88^\circ$$

$$= 0.174 \angle -179.87^\circ$$

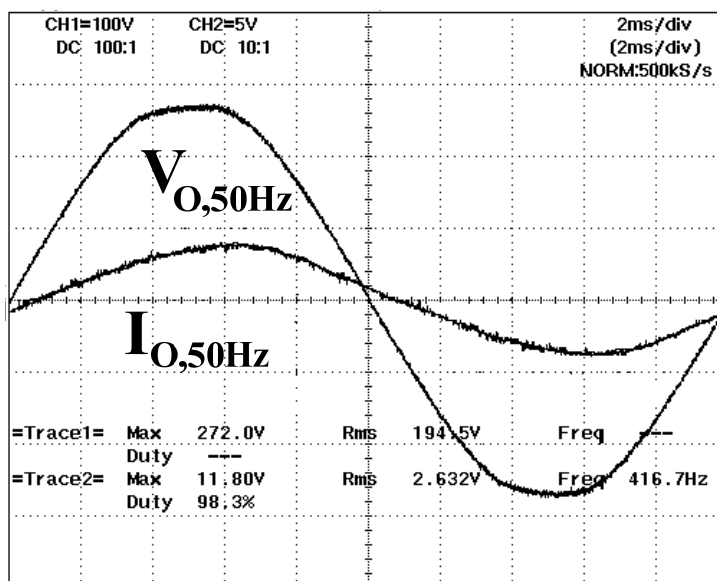
แรงดันความถี่ต่ำ 50 Hz ที่ผ่าน LC ฟิเตอร์จะได้เท่ากับ $= 0.177 \angle -179.87^\circ$

จากตัวอย่างการคำนวณหาขนาดแรงดันที่สามารถไหลผ่าน LC ฟิเตอร์ระหว่างแรงดันความถี่ต่ำ 50 Hz กับแรงดันความถี่สูง 20 kHz โดยมีตัวชี้ไขเคลเท่ากับ 50 % สามารถสรุปได้ดังตารางที่ ค-1

ตารางที่ ค-1 เปรียบเทียบการกรองแรงดันที่มีความถี่ตั้งแต่ 20 kHz กับ 50Hz

Load	D	$V_{O,50Hz}$	$V_{L,50Hz}$	$V_{O,50Hz, Filter} = V_{C,50Hz}$	$[\%] V_{O,50Hz}$	$V_{O,20kHz}$	$V_{L,20kHz}$	$V_{O,20kHz, Filter} = V_{C,20kHz}$	$[\%] V_{O,20kHz}$
NO Load	50%	110	0.73	109.27	99.33%	70	69.83	0.17	0.24 %
Load R	50%	110	0.73	109.27	99.33%	70	69.83	0.17	0.24 %
Load RL	50%	110	0.58	109.42	99.47%	70	69.83	0.17	0.24 %

จากหลักการคำนวณที่ได้แสดงเป็นตัวอย่างนี้ในทางปฏิบัติได้นำชุดทดลองวงจรเอชซีชอปเปอร์ ไปใช้ขับหลอดอินคandescent ที่ซึ่งประกอบด้วยหลอด Incandescent 100 วัตต์ 4 หลอด ขนานกับอินคandescent มอเตอร์ขนาด 1/4 แรงม้า ซึ่งมีโหลดเป็นพัลลโมไบพัลลเหล็กเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 นิ้ว ผลปรากฏว่าได้คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุต $V_{O,50Hz}$ และ $I_{O,50Hz}$ ดังแสดงด้วยรูปคลื่นจากการทดลองในรูปที่ ค.7 ซึ่งเมื่อนำไปแตกสเปกตรัมเพื่อหาคลื่นพินดาเมนทอล $V_{O,50Hz}$ และ $I_{O,50Hz}$ ปรากฏว่าได้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า PF 0.9 และกำลังไฟฟ้ารวมเท่ากับ 493 วัตต์ หรือประมาณ 500 วัตต์ ที่แรงดัน rms 194.7 V และกระแส rms 2.75 A



รูปที่ ก.7 รูปคลื่นแรงดันและการแสทางด้านเอาต์พุต กรณีโหลดเป็นอินดักชันมอเตอร์ขนาด 1/4 แรงม้าซึ่งมีโหลดเป็นพัดลมใบพัดเหล็กเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 นิ้ว ต่อขนานกับ หลอดไฟ 100 วัตต์จำนวน 4 หลอดที่มีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า PF เท่ากับ 0.9 และ กำลังไฟฟ้ารวมเท่ากับ 493 วัตต์ หรือประมาณ 500 วัตต์ ที่แรงดัน rms 194.7 V และ กระแส rms 2.75 A

ภาคผนวก –ง

อุปกรณ์สวิตช์และสร้างสัญญาณที่ใช้ในชุดทดลอง

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	ว่าที่ร้อยตรี รัชฎาธิ พลชะดิน
วัน เดือน ปีเกิด	16 มกราคม 2525 ที่จังหวัดนครศรีธรรมราช
ที่อยู่	286/69 หมู่บ้านร่วมสุข ถ.คอนนก ต.มะขามเตี้ย อ.เมืองสุราษฎร์ธานี จ.สุราษฎร์ธานี 84000 โทร.077-285-574
ประวัติการศึกษา	2547 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาไฟฟ้า (ไฟฟ้ากำลัง) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง