บทที่ 5

สแตติกรีเลย์สำหรับการป้องกันหม้อแปลง

5.1 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ในการออกแบบรีเลย์เพื่อป้องกันหม้อแปลง คือต้องการออกแบบสร้างรีเลย์โดยใช้สารกึ่งตัวนำให้มีการทำงานครอบคลุมหน้าที่ที่จำเป็นในการป้องกันหม้อแปลง กล่าวคือ

5.1.1 มีลักษณะเป็นโอเวอร์เคอร์เรนท์แบบผันกลับ (Inverse **Time** **Over** Current)

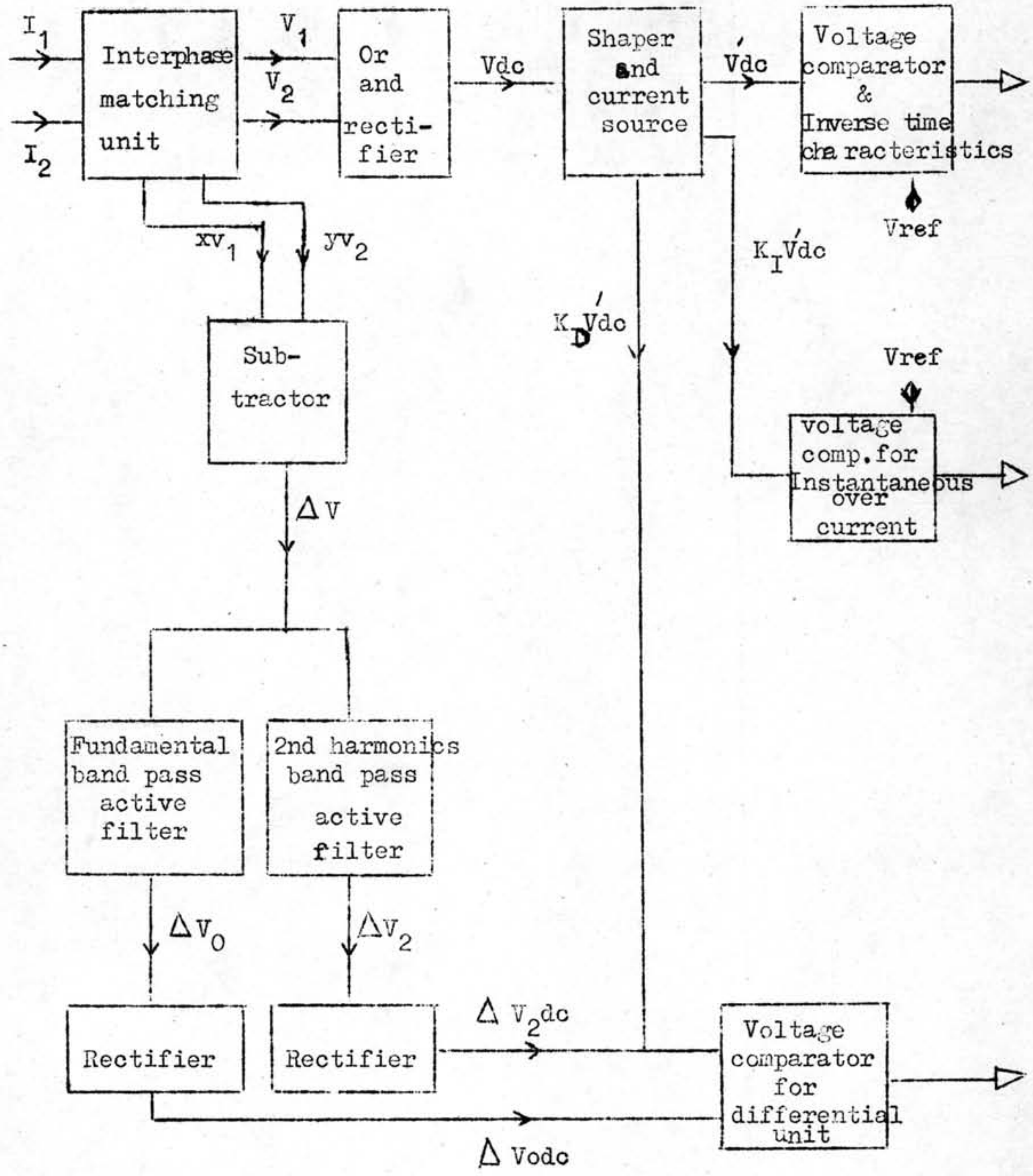
5.1.2 มีลักษณะเป็นโอเวอร์เคอร์เรนท์แบบทันที (Instanteneous Over Current)

5.1.3 มีลักษณะเป็นดิฟเฟอร์เรนท์เชี่ยล (Differential) ที่มีเปอร์เซนต์ไบอัสและฮาร์โมนิคเรสเทรน

โดยจัดรวมคุณลักษณะทั้งสามแบบไว้ในรีเลย์ตัวเดียว

5.2 ลักษณะของรีเลย์ (Block Diagram)

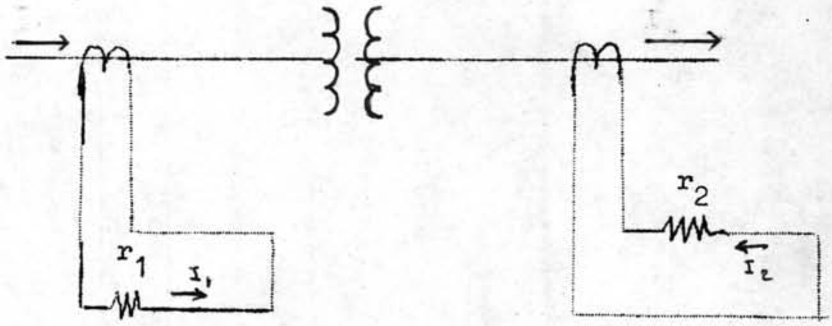
เพื่อที่จะให้รีเลย์มีลักษณะตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ รีเลย์ควรจะมีรูปแบบดังในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 รูปแบบของรีเลย์ที่ออกแบบเป็นส่วน ๆ (Block Diagram)

5.2.1 ส่วนรับกระแส (Block Inter Phase Matching Unit)

เป็นวงจรเพื่อเปลี่ยนรูปกระแส I_1 และ I_2 ซึ่งคือกระแสไหลเข้าและไหลออกของหม้อแปลง ตามรูปที่ 5.2 ให้เป็นแรงดัน V_1 และ V_2



รูปที่ 5.2 ตำแหน่งการต่อความต้านทาน

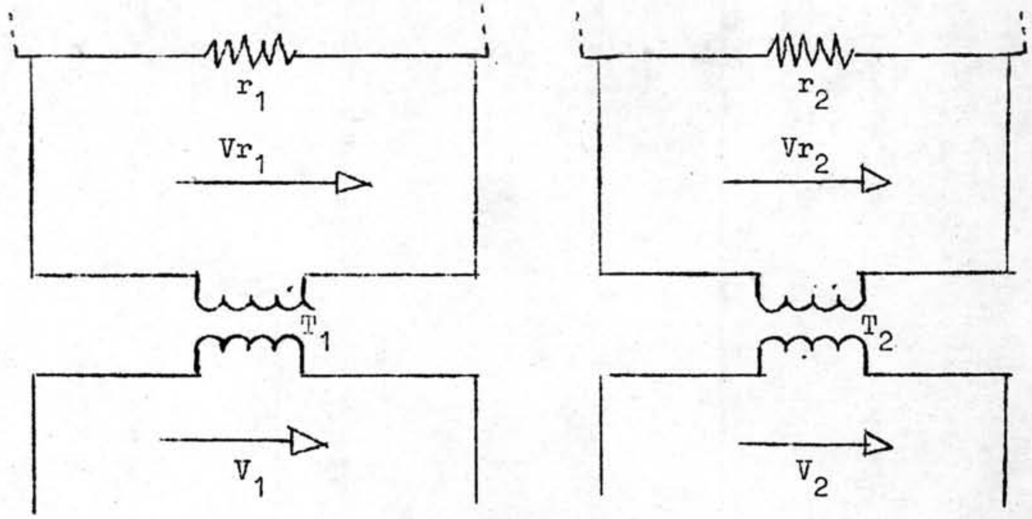
ประกอบด้วยความต้านทาน r_1 และ r_2 มีค่าเป็น 0.12 โอห์ม ทำหน้าที่เป็นโหลด (Load) ให้กระแส I_1 และ I_2 ไหลผ่านตามลำดับ

Vr_1 และ Vr_2 คือแรงดันที่เกิดขึ้นบน r_1 และ r_2 เนื่องจากปริมาณกระแส I_1 และ I_2 ตามลำดับ

$$Vr_1 = I_1 \angle\theta_1 \, r_1 = 0.12\, I_1 \angle\theta_1$$

$$Vr_2 = I_2 \angle\theta_2 \, r_2 = 0.12\, I_2 \angle\theta_2$$

θ_1 และ θ_2 คือมุมของกระแส I_1 และ I_2 ตามลำดับ



รูปที่ 5.3 ตำแหน่งการต่อหม้อแปลง T

T_1 และ T_2 คือหม้อแปลงแรงดันชนิดขดลวด แยกกันเพื่อให้วงจรของรีเลย์แยกจากวงจรของกระแสจริงโดยอิสระ และสามารถเลือกแรงดันที่เหมาะสมให้กับรีเลย์ได้ ตามรูปที่ 5.3

$$V_1 = N_1 Vr_1 = N_1 r_1 I_1 \angle \theta_1$$

$$V_2 = N_2 Vr_2 = N_2 r_2 I_2 \angle \theta_2$$

N_1 และ N_2 คืออัตราส่วน (Turn Ratio) ของหม้อแปลง T_1 และ T_2 ตามลำดับ

ถ้ามีการสร้างที่ประณีต จะสามารถใช้หม้อแปลงเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดันเพียงตัวเดียวแทนความต้านทาน (r) และหม้อแปลงแรงดัน (T) ได้ ดังได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 แล้ว แต่ในการทดลองนี้ใช้อุปกรณ์ที่สามารถหาได้ง่ายในท้องตลาด จึงได้ออกแบบเช่นนี้

5.2.2 ส่วนเรียงกระแสขนาน (Block or and Rectifier)

แรงดัน V_1 และ V_2 จะถูกทำให้เป็นแรงดันทางเดียวโดยฟูลเวฟ เรคติฟาย (Full Wave Rectifier)

$$V_1dc = K_1\,dc\,V_1 = K_1'\,dc\,I_1$$

$$V_2dc = K_2\,dc\,V_2 = K_2'\,dc\,I_2$$

K_1dc, K_2dc, $K_1'dc$, $K_2'dc$ คือค่าคงที่สำหรับการทำ เรคติฟาย เมื่อนำแรงดันทั้งสองขนานกัน แรงดันที่มีค่ามากกว่าย่อมมีผลปรากฏ

$$Vdc = V_1dc \quad \text{เมื่อ} \quad V_1dc > V_2dc$$

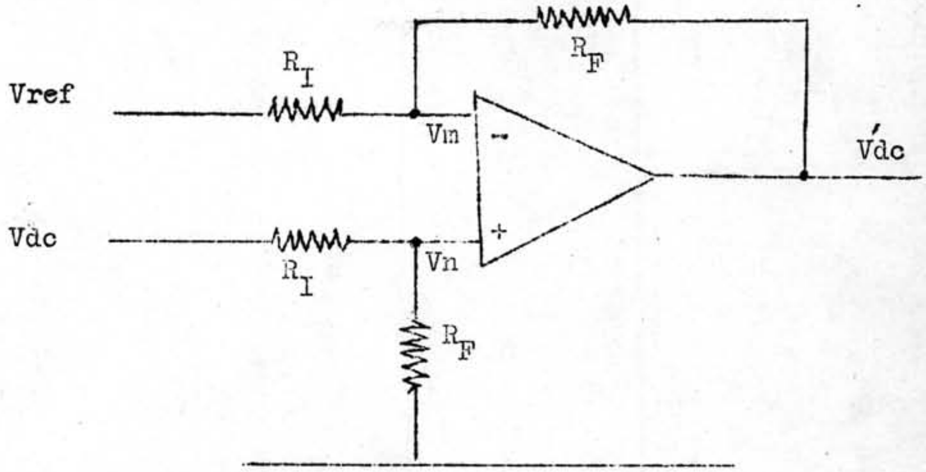
$$Vdc = V_2dc \quad \text{เมื่อ} \quad V_2dc > V_1dc$$

5.2.3 ส่วนปรับรูปให้กระแส (Block Shaper & Current Source)

เพื่อให้ Vdc มีอัตราการเพิ่มเหมาะสมกับการทำเป็นโอเวอร์เคอร์เรนท์ ใช้ไอซี ออปแอมป์ (Operational Amplifier Integrated Circuit) ทำหน้าที่ดังกล่าว และทั้งยังเป็นตัวจ่ายกระแสให้ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ในส่วนถัดไป เพื่อไม่ให้หม้อแปลง (T) จ่ายกระแสมากไป โดยต่อวงจรใช้งานในลักษณะเป็นดิฟเฟอร์เรนท์เชี่ยล ฟีดแบค แอมปลิฟาย (Differential Feed Back Amplifier)[1] ดังในรูปที่ 5.4

---

[1] Arpad Barna. Operational Amplifiers. P. 22 - 23



รูปที่ 5.4 ดิฟเฟอร์เรนท์เชี่ยล ฟีดแบก แอมปลิฟาย

$$V'dc = A\,(Vn - Vm) \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

A = เกน (Gain) ของออปแอมป์

Vn = แรงดันที่ขาบวก = $Vdc\,\frac{R_F}{R_F + R_I}$

Vm = แรงดันที่ขาลบ

อาจถือได้ว่าไม่มีกระแสไหลเข้าออปแอมป์[2]

∴ ที่ขาลบ, $\frac{Vref - Vm}{R_I} = \frac{Vm - V'dc}{R_F}$

$$\therefore \quad Vm = \left(\frac{Vref}{R_I} + \frac{V'dc}{R_F}\right)\left(\frac{R_F \cdot R_I}{R_F + R_I}\right)$$

---

[2] Walter Borlase. An Introduction to Operational Amplifiers. P. 8

แทนค่าใน (1)

$$V'dc = A\left[Vdc\frac{R_F}{R_F+R_I} - \left(\frac{Vref}{R_I}+\frac{V'dc}{R_F}\right)\left(\frac{R_F R_I}{R_F+R_I}\right)\right]$$

$$\left(1+\frac{AR_I}{R_F+R_I}\right)V'dc = \frac{AR_F}{R_I+R_F}(Vdc - Vref)$$

เนื่องจากเกนของ ออป แอมป์ สูงมาก $A \gg 1$

ดังนั้น

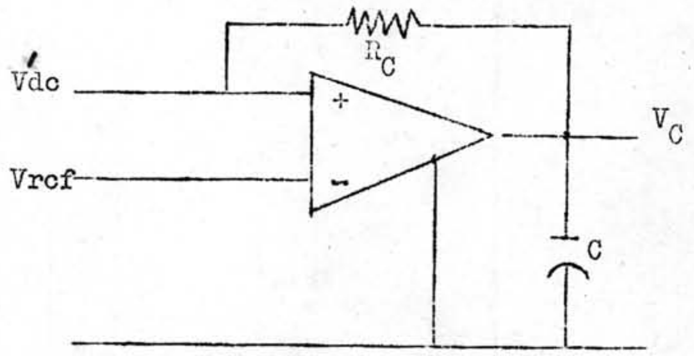
$$\frac{AR_I}{R_F+R_I}V'dc \cong \frac{AR_F}{R_F+R_I}(Vdc - Vref)$$

$$V'dc \cong \frac{R_F}{R_I}(Vdc - Vref)$$

จะได้ $V'dc$ ที่เริ่มต้นมากกว่า Vref และมีอัตราการเพิ่มที่เปลี่ยนจาก Vdc ไป $\frac{R_F}{R_I}$

5.2.4 ส่วนสร้างลักษณะผันกลับและเปรียบเทียบแรงดัน (Block Voltage Comparator และ Inverse Time Characteristics)

โดยการใช้ ไอ ซี เปรียบเทียบแรงดัน (Voltage Comparator Integrated Circuit) ต่อตามรูปที่ 5.5

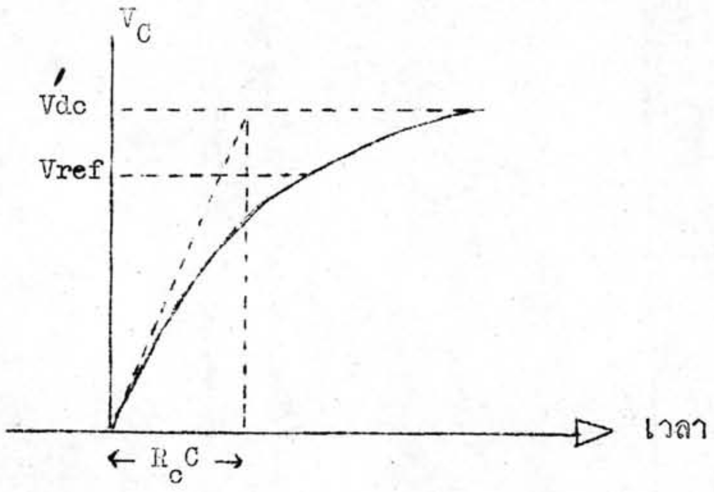


รูปที่ 5.5 วงจรสร้างลักษณะผันกลับ

เมื่อ Vdc สูงถึงค่า Vref ไอ ซี เปรียบเทียบแรงดัน จะเปิดให้ตัวเก็บประจุ C ถูกชาร์จ (Charge) ด้วยแรงดัน V́dc ผ่านความต้านทาน R_C ได้แรงดันที่ตัวเก็บประจุเป็น

$$V_C = \left(1 - e^{-\frac{t}{R_C C}}\right) V'dc$$

V_C จะสูงขึ้นในลักษณะ เอ็กซ์โปเนนเชี่ยล (Exponential) ตามรูปที่ 5.6 การจะได้แรงดันสูงถึงค่าหนึ่ง จะต้องใช้เวลาจำนวนหนึ่ง



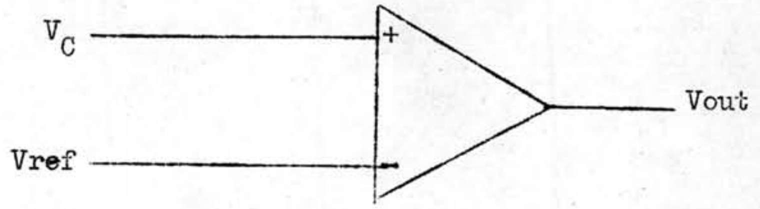
รูปที่ 5.6 ลักษณะแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ

สำหรับ ไทม์ คอนสแตนท์ (Time Constant) $R_C C$ ค่าหนึ่ง

ถ้า V́dc สูง V_C จะสูงถึง Vref เร็ว

ถ้า V́dc เท่ากับ Vref พอดี V_C จะถึง Vref นานมาก

โดยการใช้ ไอ ซี เปรียบเทียบแรงดันอีกหนึ่งตัว เพื่อเปรียบเทียบ V_C และ Vref ตามรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน

ที่ $V_C \approx$ Vref

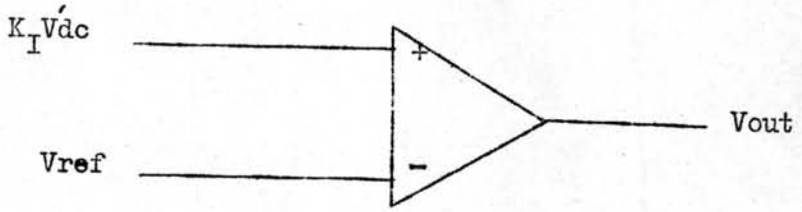
Vout จะเปลี่ยนสถานะ

นั่นคือ การทำงานในลักษณะโอเวอร์เคอร์เรนท์แบบผันกลับ

โดยการเปลี่ยน R_C จะทำให้ V_C ถึงค่าหนึ่ง (Vref) เร็วขึ้นหรือช้าลงได้ คือการเปลี่ยนไดอัล (Dial) หรือค่าหน่วงเวลา (Time Delay) ของรีเลย์นั่นเอง

5.2.5 ส่วนเปรียบเทียบแรงดันสำหรับโอเวอร์เคอร์เรนท์แบบทันที (Block Voltage Comparator for Instantaneous Over Current)

โดยการนำบางส่วนของ $V'dc$ ($K_I V'dc$) มาเปรียบเทียบกับ Vref โดยใช้ ไอ ซี เปรียบเทียบแรงดัน ตามรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 วงจรเปรียบเทียบแรงดันสำหรับโอเวอร์เคอร์เรนท์แบบทันที

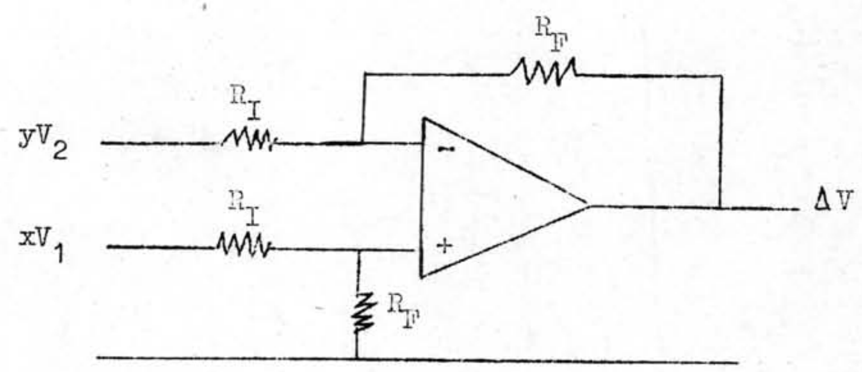
ถ้า K_I Vdc $\gtrsim$ Vref

จะได้ Vout

เป็นการทำงานในลักษณะโอเวอร์เคอร์เรนท์แบบทันที (Instantaneous Over Current Unit)

5.2.6 ส่วนหักลบกัน (Block Subtraction)

บางส่วนของแรงดัน V_1 และ V_2 ซึ่งเป็นผลจากกระแส I_1 และ I_2 ตามลำดับ นำมาหักลบกันด้วย ไอ ซี ออปแอมป์ (Operational Amplifier Integrated Circuit) ที่ต่อในลักษณะเป็น ดิฟเฟอร์เรนท์เชี่ยล ฟีดแบคแอมปลิฟาย (Differential Feed Back Amplifier) ดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 วงจรดิฟเฟอร์เรนท์เชี่ยล ฟีดแบค แอมปลิฟาย

ทำนองเดียวกันกับที่อธิบายไว้ข้างต้น จะได้

$$\Delta V = \frac{R_F}{R_I}(xV_1 - yV_2)$$

$$= \frac{R_F}{R_I}(xr_1n_1I_1\angle\theta_1 - yr_2n_2I_2\angle\theta_2)$$

โดยการปรับวงจร สามารถทำให้

$$xr_1n_1 = yr_2n_2 = D = \text{ค่าคงที่}$$

$$\therefore \Delta V = D \frac{R_F}{R_I} (I_1 \angle \theta_1 - I_2 \angle \theta_2)$$

คือได้แรงดัน ΔV ตามปริมาณกระแสที่แตกต่างกันระหว่าง I_1 และ I_2

ในการจ่ายโหลด (Load) ปกติสามารถปรับให้ ΔV เป็น 0 (ศูนย์) ได้ ดังนั้นแม้เกิดฟอลต์ภายนอกขึ้น กระแส I_1 และ I_2 จะมีค่าใกล้เคียงกันมากทั้งขนาดและมุม ค่าแตกต่างที่เกิดขึ้นอาจเป็นข้อผิดพลาดเพียงเล็กน้อย (Error) ของอุปกรณ์เท่านั้น เช่น หม้อแปลงกระแสด้านหนึ่งเกิดอิ่มตัว นั่นคือปกติ ΔV จะมีค่าน้อย

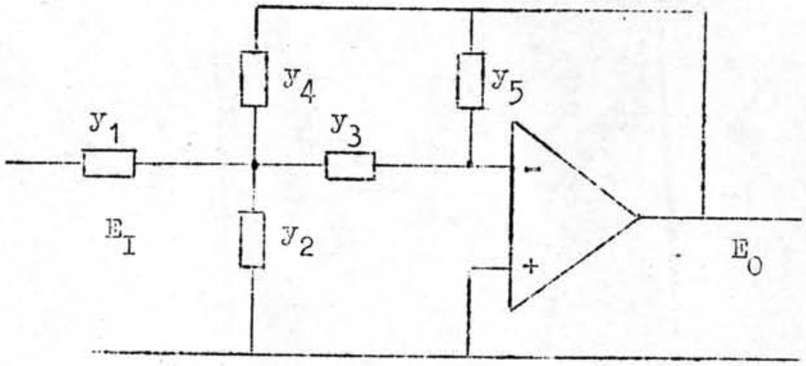
เมื่อเกิดฟอลต์ภายในขึ้น กระแส I_1 ที่ไหลเข้าหม้อแปลงจะมีปริมาณมาก ส่วนกระแส I_2 ถ้าไม่มีแหล่งจ่ายกระแส จะมีค่าน้อยลง นั่นคือ ΔV จะมีค่ามาก หรือถ้าด้าน I_2 มีแหล่งจ่ายกระแสด้วย ก็จะจ่ายกระแสเข้าไปยังหม้อแปลงด้วย ซึ่ง $\theta_2 = \theta_1 + 180^\circ$ ดังนั้น $I_1 - I_2$ จะมีปริมาณเสริมกันมากขึ้นอีก นั่นคือ ΔV มีค่ามาก

5.2.7 ส่วนกรองความถี่เฉพาะย่านความถี่ผ่านแบบแอคตีฟ(Block Band Pass Active Filter)

โดยการใช้ไอ ซี ออปแอมป์ (Operational Amplifier Integrated Circuit) ทำหน้าที่กรองให้เฉพาะย่านความถี่ผ่านแบบแอกตีฟ (Band Pass Active Filter) อยู่ในลักษณะอินฟินิทเกน มัลติเพิล ฟีดแบค (Infinite-gain Multiple Feed Back) ดังรูปที่ 5.10

---

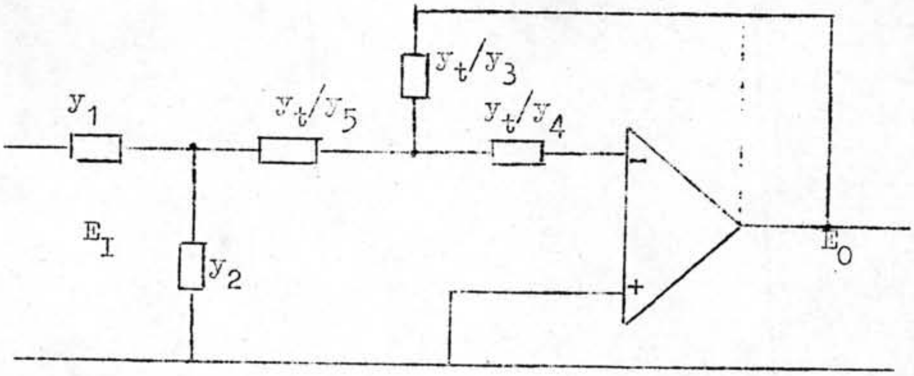
[3]Tobey, Graeme, Haelsman. Operational Amplifier Designs and Applications. P. 288 - 293



y_i = ค่าแอดมิตแทนซ์ (Admittance) ของส่วนประกอบวงจรใด ๆ

รูปที่ 5.10 วงจรอินฟินิทเกนมัลติเพิล ฟีดแบค (Infinite gain Multiple Feed Back)

โดยการเปลี่ยน y_3, y_4, y_5 ที่ต่อกันเป็นเดลตา ให้เป็นวงจรที่ต่อเป็นสตาร์[4]ได้ ดังรูปที่ 5.11



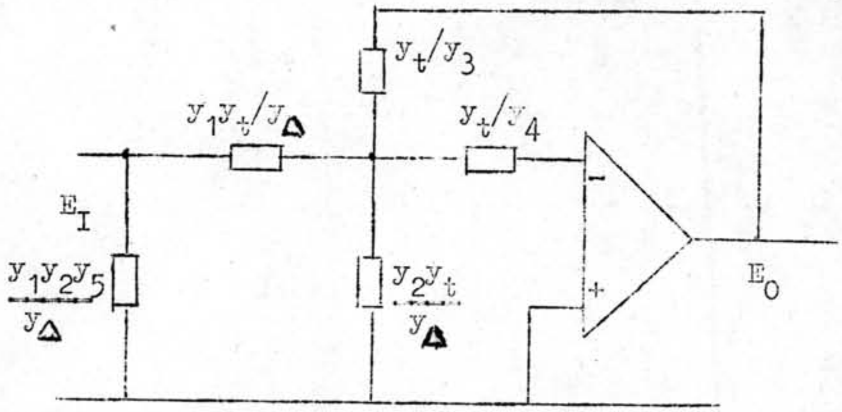
$$y_t = y_3y_4 + y_4y_5 + y_5y_3$$

รูปที่ 5.11 วงจรอินฟินิทเกน มัลติเพิล ฟีดแบค หลังเปลี่ยนแปลงครั้งที่หนึ่ง

---

[4]Dawes. Electrical Engineering. P. 88 – 89

โดยการเปลี่ยน y_1, y_2, y_t/y_5 ที่ต่อกันเป็นสตาร์ ให้เป็นวงจรที่ต่อเป็นเดลตา จะได้ดังรูปที่ 5.12



$$y_\Delta = y_2y_5 + y_1y_5 + y_t$$

รูปที่ 5.12 วงจรอินฟินิทเกน มัลติเพิล ฟีดแบก หลังเปลี่ยนแปลงครั้งที่สอง

อาจถือได้ว่าออปแอมป์มีเกน (Gain) สูงมาก ไม่มีกระแสเข้าออปแอมป์เลย และถือได้ว่า แรงดันที่ขาลบ = แรงดันที่ขาบวก = ศูนย์

กระแสเข้าเนื่องจาก $E_I \quad = \quad E_I \frac{y_1y_t}{y_\Delta}$

และกระแสออกเนื่องจาก $E_0 \quad = \quad E_0 \frac{y_t}{y_3}$

ถือได้ว่าเป็นกระแสเดียวกัน คือ

$$E_0 \frac{y_t}{y_3} = - E_I \frac{y_1y_t}{y_\Delta}$$

$$\therefore \quad \frac{E_O}{E_I} = -\frac{y_1 y_3}{y_\Delta}$$

$$= \frac{-y_1 y_3}{y_2 y_5 + y_1 y_5 + y_t}$$

$$= \frac{-y_1 y_3}{y_2 y_5 + y_1 y_5 + y_3 y_4 + y_4 y_5 + y_5 y_3}$$

$$= \frac{-y_1 y_3}{y_5(y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_3 y_4)}$$

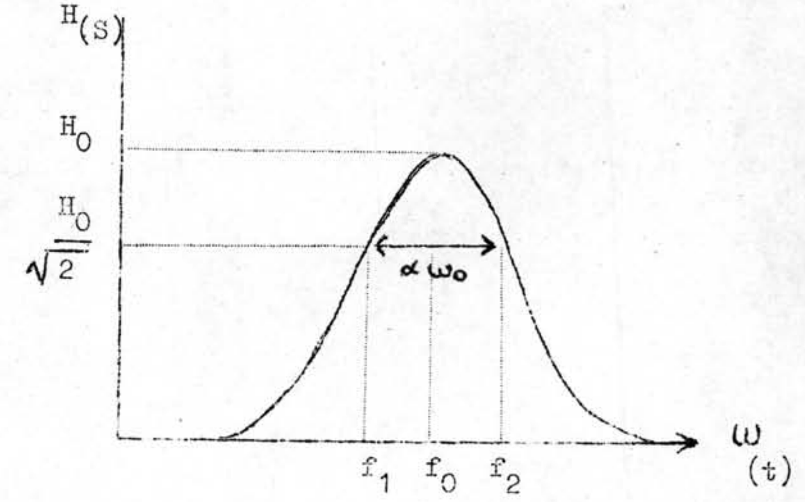
แต่จาก คอมเพลกซ์ คอนจูเกท โพลแพร์ (Complex-Conjugate-Pole Pair) ทรานส์เฟอร์ ฟังก์ชั่น (Transfer Function) สำหรับวงจรแบนด์พาส (Band Pass) โดยทั่วไปเป็น

$$H_{(S)} = \frac{H_0 \alpha \omega_0 S}{S^2 + \alpha \omega_0 + \omega_0^2}$$

H_0 = เกนที่ความถี่กลาง (Center Frequency) f_0

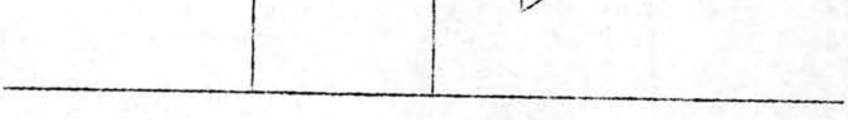
ซึ่ง $\alpha = \frac{1}{Q} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0} = \frac{f_2 - f_1}{f_0}, (\omega = 2\pi f)$

f_1, f_2 = ความถี่ที่ให้ขนาดลดลง − 3 db จาก H_0 ตามรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 ลักษณะของย่านความถี่ผ่าน

โดยการเลือกส่วนประกอบวงจรเป็นความต้านทาน (Resistors) และตัวเก็บประจุ (Capacitors) เพื่อให้ได้วงจรกรองย่านความถี่ผ่านแบบแอกตีฟ (Active Band Pass Filter) จึงเลือกส่วนประกอบวงจรเป็นตามรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 รูปวงจรกรองย่านความถี่ผ่านแบบแอกตีฟ

$$y_1 = \frac{1}{R_1}$$

$$y_2 = \frac{1}{R_2}$$

$$y_3 = C_3 S$$

$$y_4 = C_4 S$$

$$y_5 = \frac{1}{R_5}$$

$$\therefore \quad \frac{E_0}{E_I}(S) = \frac{-\left(\frac{1}{R_1}\right)(C_3 S)}{\frac{1}{R_5}\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + C_3 S + C_4 S\right) + C_3 C_4 S^2}$$

จัดรูปเพื่อเปรียบเทียบ

$$\frac{E_0}{E_I}(S) = \frac{-\left(\frac{C_3}{R_1 C_4}\right) S}{S^2 + S\left(\frac{1}{R_5}\right)\left(\frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_4}\right) + \left(\frac{1}{R_5 C_3 C_4}\right)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)}$$

จาก $$H_{(S)} = \frac{H_0 \alpha \omega_0 S}{S^2 + S \alpha \omega_0 + \omega_0^2}$$

จะได้

$$H_0 = \frac{1}{\left(\frac{R_1}{R_5}\right)\left(1 + \frac{C_3}{C_4}\right)}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{R_5 C_3 C_4}\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)}$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{R_5\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)}}\left[\sqrt{\frac{C_3}{C_4}} + \sqrt{\frac{C_4}{C_3}}\right]$$

เนื่องจากมีตัวเก็บประจุให้เลือกใช้ได้จำกัดกว่าความต้านทาน จึงเลือก[5]

$$C_3 = C_4 = C$$

$$H_0 = \frac{R_5}{2 R_1}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{R_5 C^2 (\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2})}}$$

$$\alpha = 2\sqrt{\frac{1}{R_5(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2})}}$$

$$\therefore \alpha \omega_0 = \frac{2}{R_5 C}$$

โดยการเลือกใช้ค่าที่เหมาะสม จะได้วงจรที่ให้ความถี่สำหรับ 50 Hz และ 100 Hz ผ่านได้โดยมีเกน (Gain) และ แบนด์วิด (Bandwidth) ตามต้องการได้

นำแรงดัน Δv ที่ได้จากส่วนหักลบ (Block Subtraction) มาผ่านวงจรนี้จะได้

Δv_0 เป็นแรงดันตามปริมาณกระแสแตกต่างระหว่าง I_1 และ I_2 ที่มีความถี่ 50 Hz

Δv_2 เป็นแรงดันตามปริมาณกระแสแตกต่างระหว่าง I_1 และ I_2 ที่มีความถี่ 100 Hz

---

[5] John L. Hilburn, David E. Johnson. Manual of Active Filter Design. P. 100 - 130

5.2.8 ส่วนเรียงกระแส (Block Rectifier)

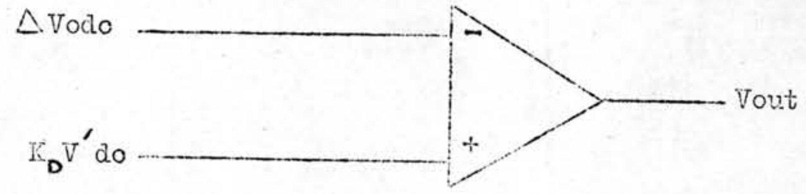
โดยใช้ฮาล์ฟเวฟ เร็คติฟาย (Half Wave Rectifier) จะได้

Δ Vodc เป็นแรงดัน ดี ซี (D.C. Voltage) ตามปริมาณกระแสแตกต่างระหว่าง I_1 และ I_2 เฉพาะที่มีความถี่ 50 Hz

ΔV_2dc เป็นแรงดัน ดี ซี ตามปริมาณกระแสแตกต่างระหว่าง I_1 และ I_2 เฉพาะส่วนที่มีความถี่ 100 Hz

5.2.9 ส่วนเปรียบเทียบแรงดันสำหรับชุดดิฟเฟอร์เรนเชี่ยล (Block Voltage Comparator for Differential Unit)

โดยการใช้ ไอ ซี เปรียบเทียบแรงดัน (Voltage Comparator Integrated Circuit) เปรียบเทียบแรงดัน ดี ซี ของ Δ Vodc กับบางส่วนของแรงดัน ดี ซี $V'dc$ ซึ่งคือแรงดัน ดี ซี ตามปริมาณของกระแส I_1 หรือ I_2 ที่นำมาจากส่วนปรับรูปให้กระแส (Block Shaper and Current Source) ตามรูปที่ 5.15



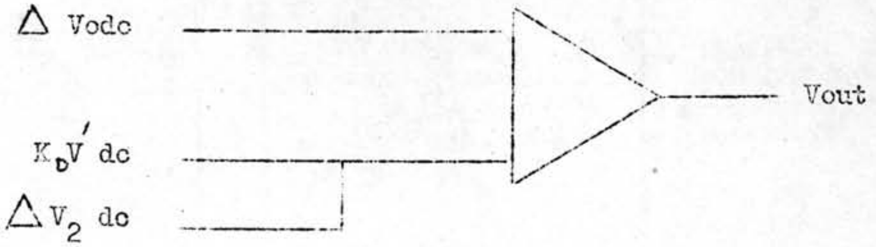
รูปที่ 5.15 วงจรเปรียบเทียบแรงดันสำหรับชุดดิฟเฟอร์เรนเชี่ยล

ที่ Δ Vodc $\geq$ $K_D V'dc$

จะได้ Vout

นั่นคือคุณสมบัติเปอร์เซ็นต์ไบอัส (Percent Bias) ของรีเลย์แบบดิฟเฟอร์เรนเชี่ยล ซึ่งจะทำงานเมื่อกระแสแตกต่าง $I_1 - I_2$ (ให้แรงดัน Δ Vodc) มากถึงค่าหนึ่งของกระแสผ่านหม้อแปลง คือ I_1 หรือ I_2 (ให้แรงดัน $K_D V'dc$)

ขณะเดียวกัน นำแรงดัน ดี ซี ของคลื่นฮาร์โมนิกที่สอง (Second Harmonics Wave) ΔV_2dc มาเปรียบเทียบกับ Δ Vodc ที่ได ซี **เปรียบเทียบแรงดัน** ตัวเดิม ตามรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 วงจรเปรียบเทียบแรงดันสำหรับชุด
ดิฟเฟอร์เรนเชี่ยลโดยสมบูรณ์

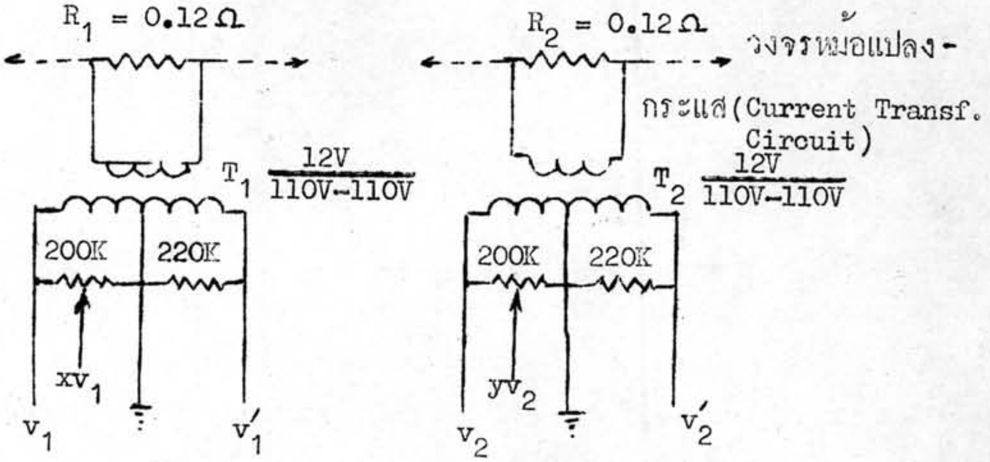
ที่ Δ Vodc = ΔV_2dc และ $K_D V'$ dc

จะได้ Vout

นั่นคือ รีเลย์แบบดิฟเฟอร์เรนเชี่ยล (Differential Relay) นี้มีคุณสมบัติของการต้านจาก ฮาร์โมนิกที่สอง (Second Harmonics Restraint) ที่สามารถปรับเปอร์เซ็นต์ได้โดยการเลือกเกน (Gain) ของวงจรกรองย่านความถี่ผ่านแบบแอคตีฟ (Band Pass Active Filter) ข้างต้น

5.3 การออกแบบและทดสองในแต่ละส่วน

5.3.1 ส่วนรับกระแส (Block interphase matching unit)



รูปที่ 5.17 รูปวงจรละเอียดของส่วนรับกระแส

5.3.1.1 วัตถุประสงค์

(1) เปลี่ยนรูปกระแสที่ต้องการตรวจวัดให้เป็นรูปแรงดันที่เหมาะสม

(2) แยกวงจรของกระแสไหลจริงในวงจรหม้อแปลงกระแส ออกจากวงจรของแรงดันที่จะให้รีเลย์ทำงาน

5.3.1.2 การทำงานของวงจร

กระแสที่ไหลในวงจรหม้อแปลงกระแสจะไหลผ่านความต้านทานที่มีค่าเพียง 0.12 โอห์ม เกิดแรงดันตกคร่อม ค.ต.ท. 0.12 โอห์มนี้ ดังตารางที่ 5.1

หม้อแปลงแรงดันที่มีอัตราส่วน 12 โวท์ล ต่อ 220 โวลท์ ซึ่งมีแทป (Tap) กลางเป็น 12 โวท์ลต่อ 110 โวท์ล – 110 โวท์ลต่อคร่อม ค.ต.ท. 0.12 โอห์ม เพื่อเพิ่มปริมาณแรงดันขึ้น ได้ผลดังตารางที่ 5.2

แรงดันจากหม้อแปลงด้านที่สองนี้ จะนำไปใช้เป็นโอเวอร์เคอร์เรนท์ โดยเร็คติฟาย (Rectifier) ให้เป็นกระแสทางเดียว และใช้เป็นดิฟเฟอเรนเชียล โดยนำออกไปเป็นบางส่วน

5.3.1.3 ส่วนประกอบของวงจร

- ความต้านทานใช้ในวงจรหม้อแปลงกระแสค่า 0.12 โอห์ม สองตัว
- หม้อแปลงแรงดันอัตราส่วน 12 โวลท์ต่อ 110 โวลท์ 110 โวลท์ สองตัว
- ค.ต.ท. เปลี่ยนค่าได้ค่า 200 กิโลโอห์ม ครึ่งวัตต์ สองตัว
- ค.ต.ท. ค่า 220 กิโลโอห์ม ครึ่งวัตต์ สองตัว

5.3.1.4 การออกแบบสร้าง

ค.ต.ท. 0.12 โอห์มเป็น ค.ต.ท.ที่ให้กระแสไหลผ่านได้สะดวก เหมาะสมเป็นตัวผ่านในวงจรหม้อแปลงกระแส แรงดันตกคร่อมที่จะนำไปใช้งานอยู่ในช่วง 20 % - 2000% ของกระแสปกติ (Rating current) กระแสปกติมีค่า 5 แอมป์ 20 % คือ 1 แอมป์ 2000% คือ 100 แอมป์ จะเกิดแรงดันตกคร่อมอยู่ในช่วง 0.12 โวลท์ - 12 โวลท์ เมื่อผ่านหม้อแปลง T_1 และ T_2 ตามรูป แรงดันจะเพิ่มเป็นอยู่ในช่วง 1.1 โวลท์ ถึง 110 โวลท์

ใช้ ค.ต.ท. เปลี่ยนค่าได้ 200 กิโลโอห์ม (เพื่อนำบางส่วนของแรงดันแยกไปใช้งานในวงจรแบบดิฟเฟอเรนเชียลต่อไป) และ ค.ต.ท. 220 กิโลโอห์มต่อคร่อมอยู่ เป็น ค.ต.ท. ที่มีค่าสูงเพื่อไม่ให้หม้อแปลง T_1 และ T_2 ใช้กระแสมาก ซึ่งจะทำให้แรงดันไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณกระแสในวงจรหม้อแปลงกระแส

ที่กระแส 10 แอมป์จะเกิดแรงดันทางด้านที่สองของหม้อแปลง T_1 และ T_2 เป็น 11 โวลท์ ซึ่งจะมีกระแสไหลเพียง

$$2 \times \frac{11 \text{ โวลท์}}{200 \text{ กิโลโอห์ม}} = 0.11 \text{ mA}$$

กระแสในด้านที่หนึ่งของหม้อแปลง T_1 และ T_2 จะมีเพียง

$$0.11 \text{ mA} \times \frac{110}{12} = 1.083 \text{ mA}$$

จะเห็นว่าค่า 1 mA ต่างจากกระแส 10 A มาก ไม่มีผลต่อกระแสในวงจรหม้อแปลงกระแส หรือกล่าวได้ว่าแรงดันที่ได้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณกระแส

5.3.1.5 การทดลองเพื่อวัดแรงดันตกคร่อมความต้านทานค่า 0.12 โอห์ม และแรงดันหลังผ่านหม้อแปลงแล้ว

(1) เครื่องมือที่ใช้

- เครื่องกำเนิดกระแส
- ดิจิตอลมัลติมิเตอร์
- แอมป์มิเตอร์

(2) วิธีทำ

โดยการจ่ายกระแสจากเครื่องกำเนิดกระแสผ่าน ค.ต.ท. 0.12 โอห์ม ทั้งสองตัวที่ต่ออนุกรมกันอยู่ แล้ววัดแรงดันที่ตกคร่อม ค.ต.ท. 0.12โอห์มทั้งสองตัว และวัดแรงดันคร่อม ค.ต.ท. 200 กิโลโอห์ม หลังหม้อแปลง T_1 และ T_2

(3) ผล

กระแส (แอมป์)	แรงดันตกคร่อม ค.ต.ท.ค่า 0.12 โอห์ม (โวลท์)			
	ตัวที่ 1 (R_1)		ตัวที่ 2 (R_2)	
	เพิ่มกระแสขึ้น	ลดกระแสลง	เพิ่มกระแสขึ้น	ลดกระแสลง
1	0.1128	0.113	0.1131	0.113
2	0.241	0.225	0.241	0.226
3	0.337	0.333	0.342	0.339
4	0.468	0.447	0.469	0.456
5	0.585	0.580	0.587	0.581
6	0.720	0.698	0.711	0.700
7	0.820	0.818	0.834	0.830
8	0.957	0.944	0.960	0.964
9	1.069	1.060	1.077	1.075
10	1.221	1.21	1.221	1.21
12	1.47	1.46	1.47	1.46
14	1.77	1.76	1.78	1.76
16	2.10	2.06	2.11	2.06
18	2.46	2.40	2.47	2.40
20	2.75	2.73	2.76	2.74
22	2.99	2.98	2.98	2.96
26	3.73	-	3.68	-
30	4.20	-	4.20	-
34	4.7	-	4.7	-

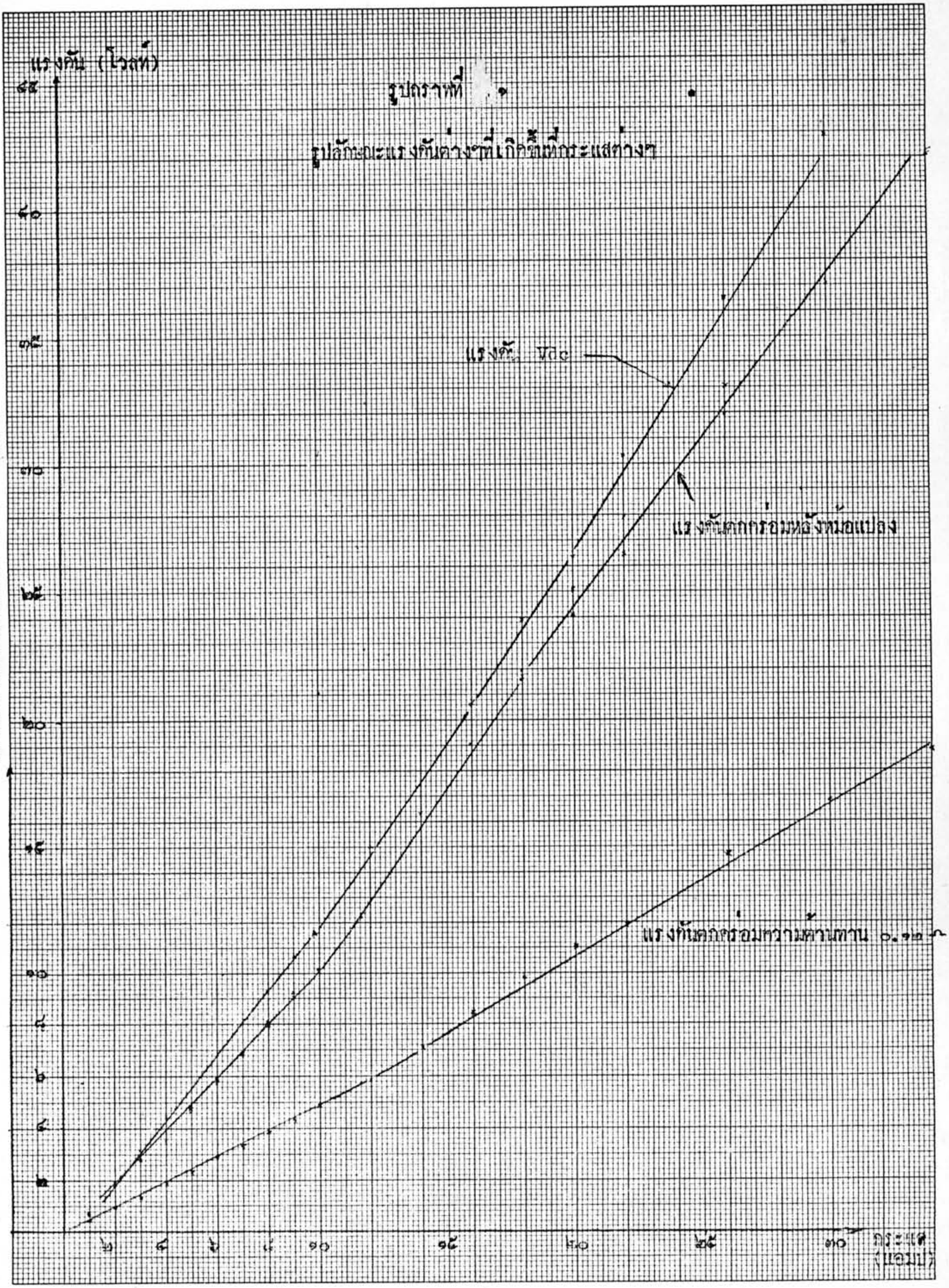
ตารางที่ 5.1 แรงดันตกคร่อม ค.ต.ท. ค่า 0.12 โอห์มที่กระแสต่าง ๆ

ค่าที่ได้แตกต่างจากสูตร V = IR บ้าง เนื่องจากค่าความต้านทานของขดลวดที่ใช้ทำนั้นมีเปลี่ยนแปลงไปบ้างตามความร้อนที่เกิดขึ้น โดยเฉพาะเมื่อปริมาณกระแสสูง ความร้อนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ค่า ค.ต.ท. เปลี่ยนเร็วด้วย ซึ่งมีผลต่อปริมาณกระแสที่ไหลในวงจรทดลองด้วย ทำให้แรงดันที่วัดมีเออร์เรอร์ (Error) มากขึ้น

การใช้ลวด ค.ต.ท.ต่อในวงจรกระแสจริงเช่นนี้ จึงเป็นการใช้อุปกรณ์ที่ให้ผลไม่ละเอียดนัก

กระแส (แอมป์)	แรงดันตกคร่อม R_1 (โวลท์)	แรงดันตกคร่อมหลัง T_1,V_1 (โวลท์)	แรงดันตกคร่อม R_2 (โวลท์)	แรงดันตกคร่อมหลัง T_2,V_2 (โวลท์)
1	0.1128	0.899	0.1131	0.922
2	0.241	1.799	0.241	1.848
3	0.337	2.737	0.342	2.815
4	0.468	3.715	0.469	3.785
5	0.585	4.749	0.587	4.852
6	0.720	5.768	0.711	5.856
7	0.820	6.780	0.834	6.910
8	0.957	8.063	0.960	8.073
9	1.069	9.096	1.077	9.237
10	1.221	10.09	1.221	10.15
12	1.47	12.79	1.47	12.81
14	1.77	16.29	1.78	16.32
16	2.10	19.06	2.11	19.07
18	2.46	21.78	2.47	21.92
20	2.75	24.14	2.76	25.07
22	2.99	26.45	2.98	27.96
26	3.73	31.98	3.68	33.01
30	4.20	37.12	4.20	37.17
34	4.70	42.05	4.70	42.13

ตารางที่ 5.2 แรงดันตกคร่อม ค.ต.ท. 200 กิโลโอห์มหลังหม้อแปลง T_1 และ T_2


แรงดัน (โวลท์)
รูปกราฟที่ ๑
รูปลักษณะแรงดันต่างๆที่เกิดขึ้นที่กระแสต่างๆ
แรงดัน Vdc
แรงดันตกคร่อมหลังหม้อแปลง
แรงดันตกคร่อมความต้านทาน ๐.๑๒ Ω
แรงดันคร่อมความต้านทาน ๐.๑๒ Ω (V)
กระแส (แอมป์)

จากรูปกราฟที่ 5.1 รูปของแรงดันตกคร่อม ก.ต.ท. ค่า 0.12 โอห์ม (แสดงค่าตอนเพิ่มกระแสขึ้นเท่านั้น) จะเป็นลักษณะค่อนข้างเป็นเส้นตรง

รูปแรงดันหลังหม้อแปลง (T) ดังแสดงในรูปกราฟที่ 1 จะเห็นเป็นรูปลักษณะเส้นตรงเช่นกันในช่วงแรก ซึ่งจะไม่ผ่านค่าศูนย์เพราะหม้อแปลงต้องการกระแสเอ็กไซต์ (Excited) ในช่วงกระแสมาก ๆ กระแสเอ็กไซต์ (Excite)นี้จะเพิ่มขึ้นด้วย

5.3.1.6 การทดลองเพื่อวัดค่ามุมแตกต่าง (Phase shift error) หลังจากผ่านหม้อแปลง T_1 และ T_2 แล้ว

(1) เครื่องมือที่ใช้

- เครื่องกำเนิดกระแส
- ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ชนิด ๒ แกน (Beam)

(2) วิธีทำ

จากการทดลองเดิมใช้ออสซิลโลสโคปวัดแรงดัน XV_1 และ YV_2 เพื่อจะเปรียบเทียบเฟส (Phase) ของทั้งสองแรงดัน โดยการวัดที่ครึ่งไซเคิล (Cycle) เปรียบเทียบกัน (เปรียบเทียบเป็น 180°)

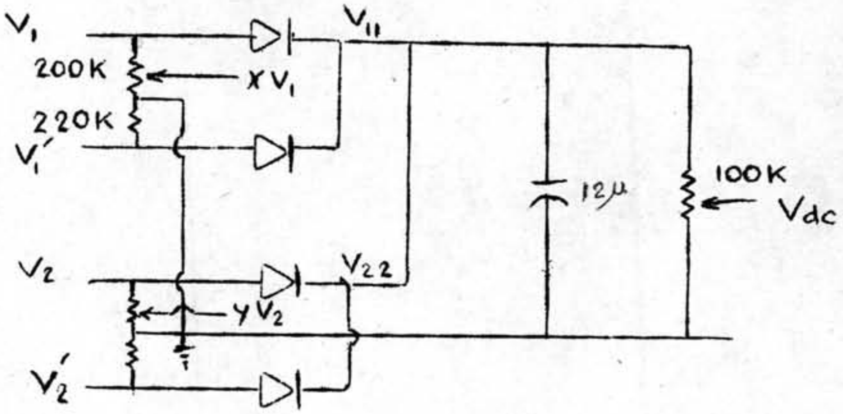
(3) ผล

กระแส (แอมป์)	เฟสที่แตกต่างกัน (องศา)
1	3.6
1.5	3.24
2.0	2.52
2.5	1.8
3.0	1.26
3.5	0.72
4.0	น้อยมาก

ตารางที่ 5.3 ค่ามุมแตกต่างหลังหม้อแปลง (T) ที่กระแสต่าง ๆ

จะเห็นว่าที่กระแสต่ำเกิดความแตกต่างมากที่สุด แต่ก็เพียง 2 % อาจเพราะการเอ็กไซต์ (Excite) หม้อแปลงยังไม่สมบูรณ์ แต่ที่กระแสสูงค่าแตกต่างน้อยมาก ซึ่งเป็นช่วงการทำงานของรีเลย์ด้วย

5.3.2 ส่วนเรียงกระแสขนาน (Block or & rectifier)



รูปที่ 5.18 รูปวงจรละเอียดของส่วนเรียงกระแสขนาน

5.3.2.1 วัตถุประสงค์

เร็คติฟาย (Rectifier) แรงดันสลับ V_1 และ V_2 ให้เป็นแรงดันทางเดียว แล้วรวมกันในลักษณะขนาน (or) พร้อมทั้งกรอง (Filter) ให้ได้ V_{dc} ที่เรียบพอสมควร เพื่อนำไปใช้งานเป็นโอเวอร์เกอร์เรนท์ต่อไป

5.3.2.2 การทำงานของวงจร

แรงดัน V_1 และ V_1', V_2 และ V_2' ผ่านฟูลเวฟเร็คติฟาย (Full wave rectifier) ด้วยไดโอด (Diode) สองชุด ชุดละสองตัว ได้กระแสทางเดียว V_{11} และ V_{22} ซึ่งถูกต่อรวมกันโดยตรง ผลของแรงดันที่มากกว่าจะปรากฏ (ลักษณะขนาน) แล้วกรอง (Filter) ด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitor)

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.3.2.3 ส่วนประกอบวงจร

- ไดโอด (Diode) เพื่อทำหน้าที่เร็คติฟาย (Rectifier) 4 ตัว
- ตัวเก็บประจุ (Capacitor) เพื่อกรอง (Filter) 1 ตัว ค่า 2 μF
- ค.ต.ท. เปลี่ยนค่าได้ 100 กิโลโอห์ม เป็นตัวสำหรับตั้งค่าเริ่มทำงานด้วย

5.3.2.4 การออกแบบวงจร

ใช้ ค.ต.ท. เปลี่ยนค่าได้ 100 กิโลโอห์ม ต่อเพื่อนำ V_{dc} ออกไปใช้งาน ตามรูป 5.18 ค.ต.ท. เปลี่ยนค่าได้ (Volume) นี้เป็นตัวตั้ง (Setting) สำหรับค่าเริ่มทำงานของรีเลย์ด้วย โดยจะตั้งให้ที่ตำแหน่งรีเลย์เริ่มทำงาน V_{dc} มีค่าเป็นหนึ่งโวลท์

การใช้กระแสของรีเลย์เพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยที่กระแสจริง 10 A กระแสในรีเลย์จะเพิ่มอีก

$$\frac{22\ \text{V}}{100\ \text{กิโลโอห์ม}} = 0.22\ \text{mA}$$

ใช้ C ค่า 2 μF เพื่อทำหน้าที่กรองแรงดันให้เรียบพอสมควร ซึ่งจะมีค่าริปเปิล-แฟคเตอร์ (Ripple factor) โดยประมาณสำหรับฟูลเวฟเร็คติฟาย (Full wave rectifier)[6] เป็น

$$\frac{1}{4\sqrt{3}\ f\ RC} = \frac{1}{4\sqrt{3} \times 50\text{Hz.} \times 100\ \text{กิโลโอห์ม} \times 2\mu\text{F}}$$

$$= 0.014 = 1.4\ \%$$

---

6 Samuel Seely, Ph.D. Radio Electronics. p. 72

5.3.2.5 การทดลองเพื่อวัดแรงดัน V_{dc}

(1) เครื่องมือที่ใช้

- เครื่องกำเนิดกระแส
- ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital multimeter)
- แอมป์มิเตอร์ (Ammeter)
- ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)ชนิด ๒ แกน (Beam)

(2) วิธีทำ ป้อนกระแสจากเครื่องกำเนิดกระแส เช่นเดียวกับการทดลองเดิม แล้ววัดแรงดัน V_{dc} พร้อมใช้ออสซิลโลสโคป(Oscilloscope) วัดดูรูปลักษณะของแรงดันว่าเรียบพอหรือไม่

(3) ผล เนื่องจากแรงดันค่อนข้างมีริปเปิล (Ripple)สูง จึงเพิ่มค่า C อีก 10 μF รวมเป็น 12 μF ค่าริปเปิลแฟคเตอร์ (Ripple factor) โดยประมาณเหลือเพียง 0.0023 = 0.23 % แต่มีผลทำให้การลดลงของ V_{dc} มี Time constant นานถึง 100 K x 12μ = 1.2 sec.

กระแส (แอมป์)	V_{dc} (โวลท์)
1	0.795
2	1.903
3	3.193
4	4.528
5	5.878
6	7.238
7	8.012
8	9.358

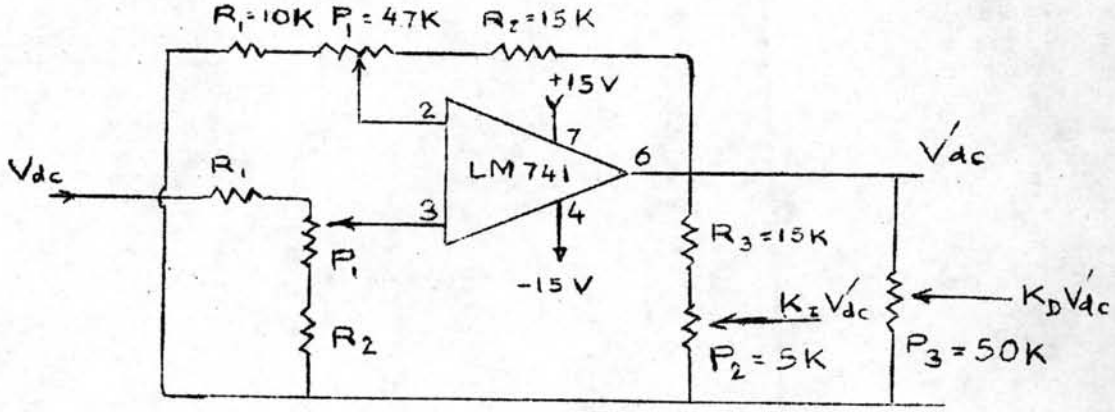
ตารางที่ 5.4 แรงดัน V_{dc} ที่กระแสต่าง ๆ

กระแส (แอมป์)	V_{dc} (โวลท์)
9	10.66
10	11.69
12	14.97
14	17.93
16	20.58
18	23.92
20	26.38
22	30.31
26	36.47
30	42.87
34	48.57

ตารางที่ 5.4 แรงคัน V_{dc} ที่กระแสต่าง ๆ

เขียนเป็นรูปแสดงรวมไว้ในกราฟที่ 1 เช่นกัน ได้ลักษณะที่เป็นเส้นตรงพอสมควร หมายถึงอัตราการเพิ่มของ V_{dc} ซึ่งจะเป็นการทำงานของรีเลย์ จะเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับกระแส

5.3.3 ส่วนปรับรูปให้กระแส (Block shaper&current source)



รูปที่ 5.19 รูปวงจรละเอียดของส่วนปรับรูปให้กระแส

5.3.3.1 วัตถุประสงค์

(1) เพื่อให้อัตราการเพิ่มของแรงดัน V_{dc} อันเนื่องมาจากกระแสเป็นไปโดยเหมาะสมจะใช้งานเป็นโอเวอร์เคอร์เรนท์

(2) แรงดันที่จะนำไปใช้งานในส่วนถัดไป จะต้องจ่ายให้ตัวเก็บประจุ (Charge capacitor) กระแสที่ใช้จะได้จากแหล่งจ่ายไฟ (Power supply) โดยตรง ไม่ทำให้แรงดัน V_{dc} เปลี่ยนแปลงมาก

5.3.3.2 การทำงานของวรจร

แรงดัน V_{dc} จะถูกขยายโดยไอซีออปแอมป์ (Operational amplifier integrated circuit) ซึ่งต่อในลักษณะเป็นวงจรดิฟเฟอร์เรนเชียลฟีดแบคแอมปลิฟาย (Differential feedblack amplifier) ซึ่งวงจรต้องประกอบด้วย ค.ต.ท. R_1, R_2 และ ค.ต.ท. ที่เปลี่ยนค่าได้ P_1 ได้แรงดัน V'_{dc} เป็น

$$V'_{dc} = \frac{R_2 + n P_1}{R_1 + (1-n)P_1} (V_{dc} - 0)$$

n = อัตราส่วนของ ก.ต.ท.เปลี่ยนค่าได้ P_1

ดูรูปวงจรประกอบ

แรงดัน V'_{dc} นำไปใช้เพื่อจะทำโอเวอร์เคอร์เรนท์แบบผันกลับ (Inverse time overcurrent) ต่อไป

บางส่วนของแรงดัน V'_{dc} ($K_I V'_{dc}$) จะนำไปใช้เป็นโอเวอร์เคอร์เรนท์แบบทันที (Instantaneous over current) จึงใช้ ก.ต.ท. R_3 ต่ออนุกรมกับ ก.ต.ท.เปลี่ยนค่าได้ P_2 เพื่อนำแรงดันที่ต้องการไปใช้งานได้ P_2 นี้เป็นตัวสำหรับตั้งการทำงานของโอเวอร์เคอร์เรนท์แบบทันทีที่จะทำงานเป็นจำนวนเท่าของค่าเริ่มทำงาน ของโอเวอร์เคอร์เรนท์แบบผันกลับ (Inverse time over current)

นำบางส่วนของ V'_{dc} ($K_D V'_{dc}$) ออกไป เพื่อใช้งานในหน้าที่ต้าน (Restraint) สำหรับชุดดิฟเฟอร์เรนเชียล (Differential unit) โดยใช้ ก.ต.ท.เปลี่ยนค่าได้ P_3 ซึ่งเป็นตัวตั้งเปอร์เซ็นต์ไบอัส สำหรับดิฟเฟอร์เรนเชียล

5.3.3.3 ส่วนประกอบวงจร

- ก.ต.ท.ค่า 10 กิโลโอห์ม 2 ตัว
- ก.ต.ท.เปลี่ยนค่าได้ 4.7K 2 ตัว
- ก.ต.ท.ค่า 15 กิโลโอห์ม 2 ตัว
- ไอซี (Integrated circuit)
  เบอร์ LM741 1 ตัว
- ก.ต.ท.ค่า 15 กิโลโอห์ม 1 ตัว
- ก.ต.ท.เปลี่ยนค่าได้ 5 กิโลโอห์ม 1 ตัว
- ก.ต.ท.เปลี่ยนค่าได้ 50 กิโลโอห์ม 1 ตัว

5.3.3.4 การออกแบบวงจร

แรงดัน V_{dc} จะถูกตั้งที่ค่าเริ่มทำงาน มีค่าแรงดันหนึ่งโวลท์ เพื่อให้ V'_{dc} มีอัตราการเพิ่มใกล้เคียงกับ V_{dc} คือ มีเกน (Gain) ของวงจรดิฟเฟอเรนเชียลฟีดแบคแอมปลิฟาย (Differential feedback amplifier) เป็นหนึ่ง

เลือก $R_1 = 10$

$R_2 = 15$

$P_1 = 4.7$

P_1 ทำให้สามารถปรับอัตราส่วน $\frac{R_2 + n P_1}{R_1 + (1-n) P_1}$ ของทั้งสองด้าน (ด้านบวกและด้านลบของออปแอมป์ให้เป็นอัตราส่วนเดียวกัน และสามารถเลือกเกน (Gain) ได้ประมาณตั้งแต่ 1 ถึง 2 คือ

เมื่อปรับเป็น $\frac{15 + 0}{10 + 4.7}$ ได้เกน (Gain) 1.02

เมื่อปรับเป็น $\frac{15 + 4.7}{10 + 0}$ ได้เกน (Gain) 1.97

ในการทดลองนี้ใช้เกน (Gain) ประมาณ 1

เพื่อให้ตั้งค่าทำงานของโอเวอร์เคอร์เรนท์แบบทันที ได้ตั้งแต่สี่เท่าของค่าเริ่มทำงานของโอเวอร์เคอร์เรนท์แบบผันกลับขึ้นไป จึงเลือก ค.ต.ท. เปลี่ยนค่าได้สำหรับตั้งมีค่า $P_2 =$ 5 กิโลโอมห์ ต่ออนุกรม กับ ค.ต.ท. $R_3 =$ 15 กิโลโอห์ม ซึ่งหมายถึงที่สี่เท่าค่าเริ่มทำงาน $V'_{dc} = 1 \times 4 = 4$ โวลท์ จะสามารถตั้งให้แรงดัน $K_I V'_{dc}$ เป็น $\frac{5 \times 4}{5 + 15} =$ 1 โวลท์ นั่นคือ สามารถได้ $K_I V'_{dc}$ ออกไปตั้งแต่ 4 เท่า ค่าเริ่มทำงานของโอเวอร์เคอร์เรนท์แบบผันกลับ

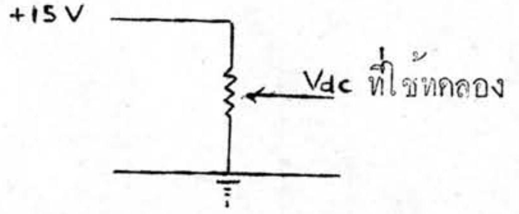
เพื่อให้ค่าต้าน (Restraint) สำหรับชุดดิฟเฟอร์เรนเชียล (Differential unit) มีผลตั้งแต่แรงดันต่ำ จึงใช้ ค.ต.ท. เปลี่ยนค่าได้ $P_3 =$ 50 กิโลโอห์ม ต่อตามรูปวงจร (เพื่อไม่ให้ใช้กระแสมากจึงใช้ ค.ต.ท.สูง) ซึ่งหมายถึงสามารถนำแรงดัน V'_{dc} ออกไปได้โดยตรงด้วย ค.ต.ท. เปลี่ยนค่าได้ P_2 นี้เป็นตัวตั้งเปอร์เซ็นต์ไบอัสสำหรับชุดดิฟเฟอร์เรนเชียล

5.3.3.5 การทดลอง เพื่อวัดค่าเปรียบเทียบระหว่างแรงดัน V_{dc} และ V'_{dc}

(1) เครื่องมือที่ใช้

- แหล่งจ่ายไฟ (Power supply) 2 ชุดสำหรับบวกและลบของไอซี
- ออสซิลโลสโคปชนิด ๒ แกน
- ดิจิตอลมัลติมิเตอร์

(2) วิธีทำ ต่อวงจรตามรูป ใส่แรงดันดีซี (D.C. voltage) โดยนำจากแหล่งจ่ายไฟด้านบวก นำมาใช้บางส่วนโดยใช้ ค.ต.ท. เปลี่ยนค่าได้ 100 กิโลโอห์ม ต่อดังรูปที่ 5.20



ปรับให้ V_{dc} เป็น 1 โวลท์ โดยปรับ P_1 ให้อยู่ในตำแหน่งที่จะให้เกน (Gain) น้อยที่สุด (คือประมาณ 1) ให้ V_{dc} ออกมาน้อยที่สุด

รูปที่ 5.20 วงจรแยกแรงดันบางส่วนใช้ทดลอง

วัด V_{dc} และ V'_{dc} โดยออสซิลโลสโคปชนิด 2 แกนเปรียบเทียบกัน

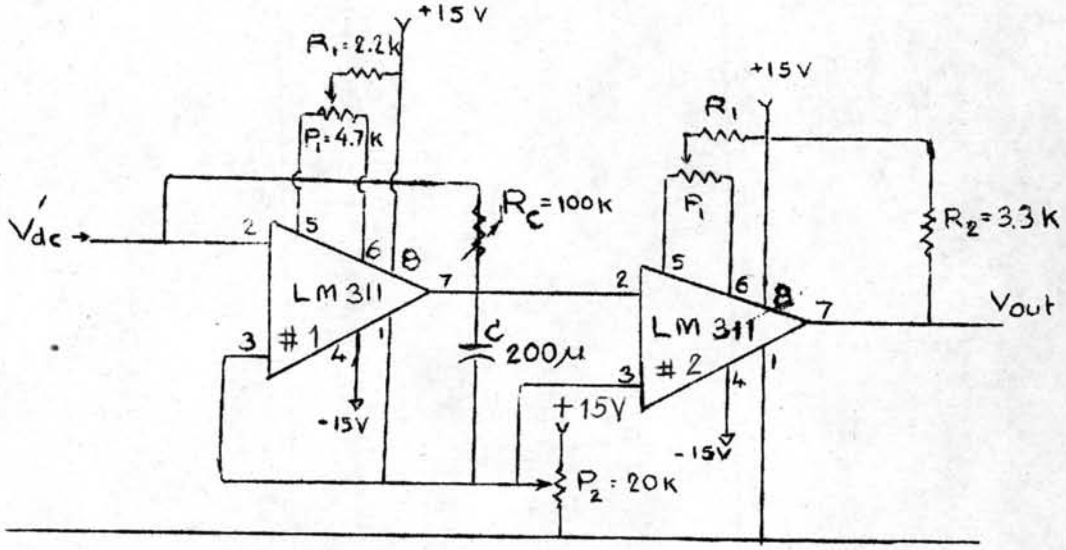
(3) ผล

ที่ V_{dc} = 1 V ได้ V'_{dc} = 1.03 V.

V_{dc} = 2 V ได้ V'_{dc} = 2.03 V.

V_{dc} = 3 V ได้ V'_{dc} = 3.1 V.

5.3.4 ส่วนสร้างลักษณะผันกลับและเปรียบเทียบแรงดัน (Block voltage comparator & Inverse time characteristic)



รูปที่ 5.21 รูปวงจรละเอียดของส่วนสร้างลักษณะผันกลับและเปรียบเทียบแรงดัน

5.3.4.1 วัตถุประสงค์

ให้ V_{out} เปลี่ยนสภาวะจากแรงดันต่ำใกล้ศูนย์ ขึ้นเป็นแรงดันมีค่า + 15 V. เมื่อมี V'_{dc} สูงถึงระดับ V_{ref} เป็นเวลานานค่าหนึ่ง นั่นคือ คุณลักษณะของโอเวอร์เคอร์เรนแบบผันกลับ (Inverse time over current)

5.3.4.2 การทำงานของวงจร

ระดับแรงดัน V_{ref} มีอยู่ค่าหนึ่งเมื่อ $V_{ref} > V'_{dc}$ แล้ว ขา 1 และขา 7 ของไอซีเปรียบเทียบแรงดัน (Voltage comparator integrated circuit) จะช็อต (Short) ถึงกัน ซึ่งจะทำให้ตัวเก็บประจุ C ไม่มีประจุเหลืออยู่ คือ แรงดัน $V_c = 0$ จนเมื่อ $V'_{dc} \geq V_{ref}$ ขา 1 และขา 7 ของไอซีตัวที่ 1 จะเปิดออก ตัวเก็บประจุ C

จะถูกชาร์จ (Charge) ด้วยแรงดัน V'_{dc} ผ่าน ค.ต.ท. R_c ทำให้แรงดัน V_c ที่ตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้นตามลักษณะเอ็กซ์โปเนนเชียล (Exponential) จนกระทั่ง $V_c = V_{ref}$ ของ I.C. #2 V_{out} จะเปลี่ยนสถานะ

5.3.4.3 ส่วนประกอบวงจร

- ไอซี No. LM311 2 ตัว
- ค.ต.ท.ค่า 2.2 กิโลโอห์ม 2 ตัว
- ค.ต.ท. เปลี่ยนค่าได้ค่า 4.7 กิโลโอห์ม 2 ตัว
- ค.ต.ท. เปลี่ยนค่าได้ค่า 20 กิโลโอห์ม 1 ตัว
- ค.ต.ท. เปลี่ยนค่าได้ค่า 100 กิโลโอห์ม 1 ตัว
- ค.ต.ท. ค่า 3.3. กิโลโอห์ม 1 ตัว
- ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ค่า 200 μF 1 ตัว

5.3.4.4 การออกแบบวงจร

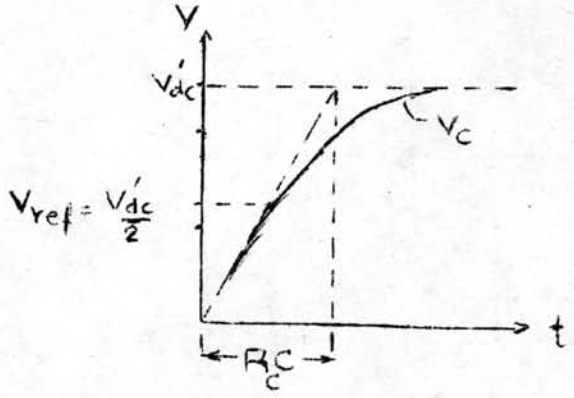
V'_{dc} ถูกตั้งให้มีค่า 1 โวลท์ ที่ค่าเริ่มทำงานมาจากส่วนต้น จึงต้องการ V_{ref} ประมาณ 1 โวลท์ด้วย ซึ่งสามารถได้จากการใช้ ค.ต.ท.เปลี่ยนค่าได้ P_1 = 20 กิโลโอห์ม ต่อจากแหล่งจ่ายแรงดัน + 15 V.

เนื่องจากในการทดลองนี้ไม่ได้เน้นถึงคุณลักษณะการผันกลับ (Inverse time characteristic) ของรีเลย์ จึงกำหนดเพียงแต่ให้มีการถ่วงเวลา (Delayed time) ได้ประมาณ 8 วินาที เมื่อ V'_{dc} เป็นสองเท่าค่าเริ่มทำงานสำหรับตำแหน่งที่ตั้งให้รีเลย์ทำงานนานที่สุด (ไดอัล (Dial) สูงสุด = 10) และรีเลย์ควรจะมีการทำงานได้เร็วขึ้นถึง $\frac{1}{10}$ เท่า คือ 0.8 sec. ได้ใน V'_{dc} เดียวกัน (2 เท่าค่าเริ่มทำงาน) สำหรับตำแหน่งที่ตั้งให้รีเลย์ทำงานได้เร็วที่สุด (ไดอัลต่ำสุด = 1)

แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ V_c มีค่าเป็น

$$V_c = V_{dc} (1 - e^{\frac{t}{R_c C}})$$

เขียนเป็นรูปได้เป็น



รูปที่ 5.22 รูปแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ

ระยะเวลาเท่ากับไทม์คอนสแตนท์ (Time constant) R_cC จะเป็นเวลาที่ได้จากการมีอัตราเพิ่มคงที่จนถึง V'_{dc} ดูรูปที่ 5.22 ประกอบ ในลักษณะการเปรียบเทียบ ถ้า $V_{ref} = \frac{V'_{dc}}{2}$ แล้ว V_c จะมีค่าเป็น $V_{ref} = \frac{V'_{dc}}{2}$ เมื่อผ่านเวลานาน $= \frac{R_cC}{2}$ โดยประมาณว่าแรงดันของตัวเก็บประจุ ในช่วงแรกเป็นเส้นตรง เพื่อให้ทำงานนานที่สุด (หมายถึงตั้งไว้ที่ไดอัล 10) ต้องการเวลานานประมาณ 8 sec. นั่นคือ

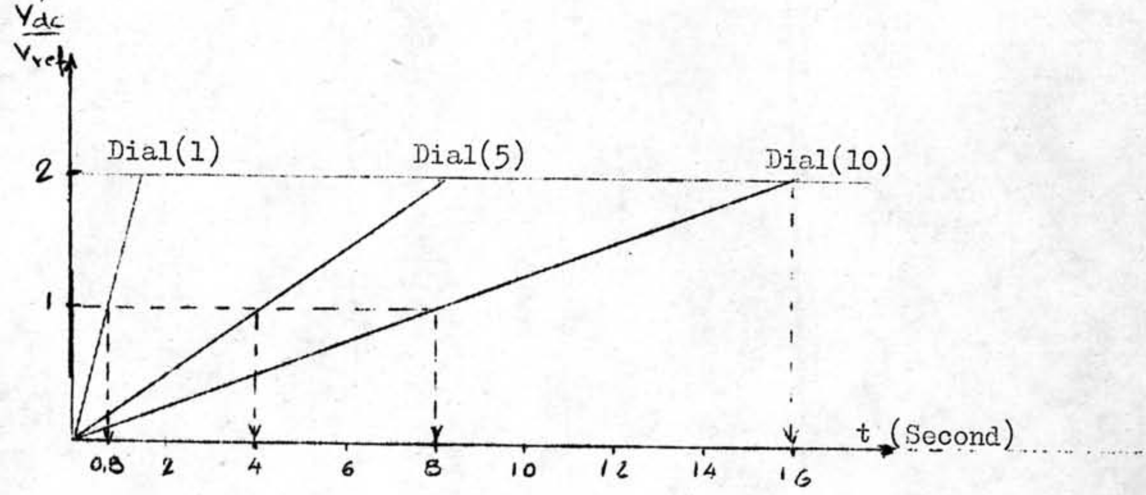
$$\frac{R_cC}{2} = 8$$

เลือกใช้ค่า C 200 μF

$$\therefore R_c = \frac{16}{200\,\mu} = 80 \text{ กิโลโอห์ม}$$

ใช้ R_c = 100 กิโลโอห์ม

เป็นค.ต.ท.ที่เปลี่ยนค่าได้ ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวตั้งเวลาในการทำงานของรีเลย์ คือตั้งไดอัลให้รีเลย์ทำงานได้เร็วหรือช้า ดังรูปที่ 5.23



รูปที่ 5.23 แสดงเวลาที่ตำแหน่งไดอัลต่าง ๆ

ค่าไดอัลควรจะปรับให้ตั้งได้ ตั้งแต่ 1 - 10

ที่ไดอัล n ใด ๆ เขียนเป็นสมการที่จะต้องปรับค่า R_c ได้เป็น

$$R_{cn}C = 16\frac{n}{10}$$

เช่นที่ไดอัล 10 $R_{c10}C$ = 16 sec.

ที่ไดอัล 1 $R_{c1}C$ = 1.6 sec.

เวลาการทำงานของรีเลย์ขึ้นอยู่กับปริมาณของ V'_{dc} ว่าจะเป็นจำนวนมากกว่า V_{ref} อยู่เท่าใด

เช่น ที่ $V'_{dc} = 2\,V_{ref}$ (ดูรูปที่ 5.23)

ที่ ไดอัล 10, $R_cC = 16$ รีเลย์ทำงาน $\frac{16}{2} = 8$ sec.

ที่ ไดอัล 1, $R_cC = 1.6$ รีเลย์ทำงาน $\frac{1.6}{2} = 0.8$ sec.

ถ้าประมาณว่า V_c ช่วงแรกเป็นเส้นตรง ที่ $V'_{dc} > 2\,V_{ref}$ ขึ้นไปแล้ว การทำงานของรีเลย์จะอยู่ในช่วงลิเนียร์ (Linear) เขียนเป็นสมการผกผันกลับกับเวลา (Inverse time) สำหรับ V'_{dc} ที่มากกว่า V_{ref} เป็นจำนวน m เท่าใด ๆ ได้เป็น

$$t = \frac{R_{cn}C}{m}$$

m = จำนวนเท่าที่ $V'_{dc} > V_{ref}$

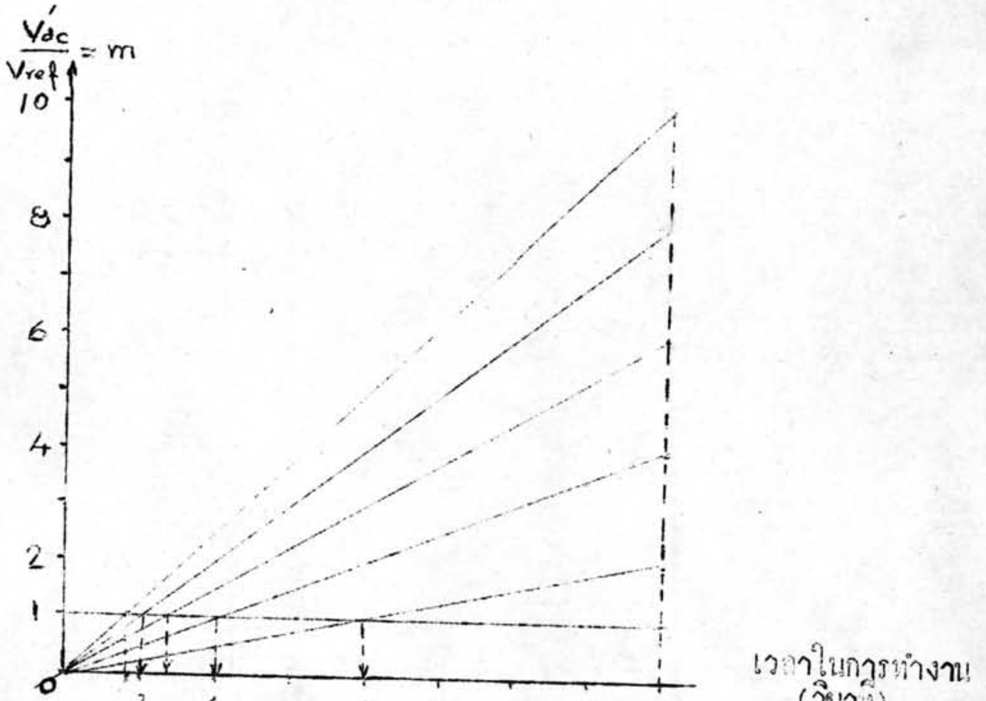
เช่น V'_{dc} = 10 V.

V_{ref} = 1 V.

m = 10

เวลาที่รีเลย์ทำงานเมื่อ $n = 10$ (ไคอัล 10)

$$= \frac{16 \times \frac{10}{10}}{10} = 1.6 \text{ sec.}$$



รูปที่ **5.24** รูปแสดงเวลาการทำงานของรีเลย์ที่ m ค่าต่าง ๆ เมื่อตั้งไว้ที่ไคอัล 10

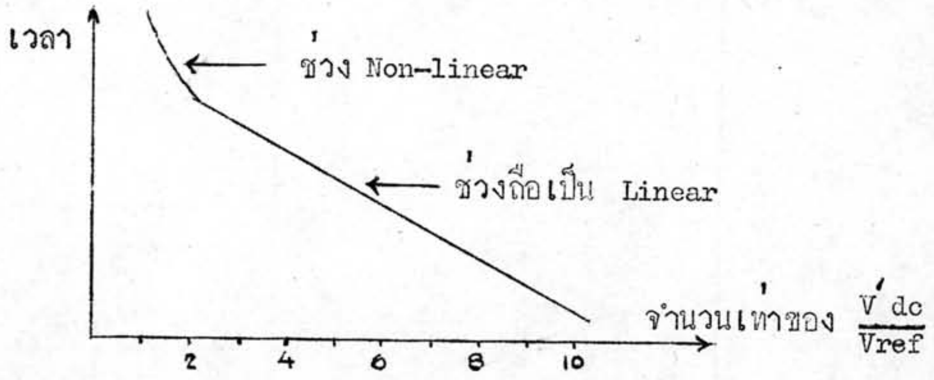
ส่วนที่ช่วงต่ำ ๆ เช่น ที่ $\frac{V_{dc}}{V_{ref}} = 1.2$

V_c อยู่ในช่วงเอ็กซ์โปเนนเชียล (Exponential) เป็น

$$V_c = V'_{dc} \left(1 - e^{-\frac{t}{R_c C}}\right)$$

เวลาที่รีเลย์ทำงาน คือ เวลา t ในสมการนั่นเอง

คุณลักษณะการผันกลับ (Inverse time characteristics) ของรีเลย์อาจเขียนเป็นรูปโดยประมาณได้ ดังรูปที่ 5.25



รูปที่ 5.25 คุณลักษณะการผันกลับของรีเลย์

ค.ต.ท. R_1 และค.ต.ท. เปลี่ยนค่าได้ P_1 ใช้ค่า 2.2 กิโลโอห์ม และ 4.7 กิโลโอห์ม ตามลำดับ เพื่อเป็นสโตรป (Strobe) และบาลานซ์ (Balance) ให้ไอซีตัวนี้ทำงานโดยถูกต้อง ค.ต.ท. R_2 = 3.3 K เป็นตัวผ่านสำหรับ +15 V. ของ I.C. นี้

5.3.4.5 การทดลองดูลักษณะการทำงานของวงจร

เนื่องจากไม่เน้นถึงเวลาที่จะถูกหน่วง (Delayed) จริง จึงเพียงทดลองดูโดยไม่ได้จับเวลาแน่นอน

(1) เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

– ออสซิลโลสโคปแบบ 2 แกน

– แหล่งจ่ายแรงดัน 2 ชุด เพื่อให้แรงดันบวกและลบแก่ไอซี

– ดิจิตอลมัลติมิเตอร์

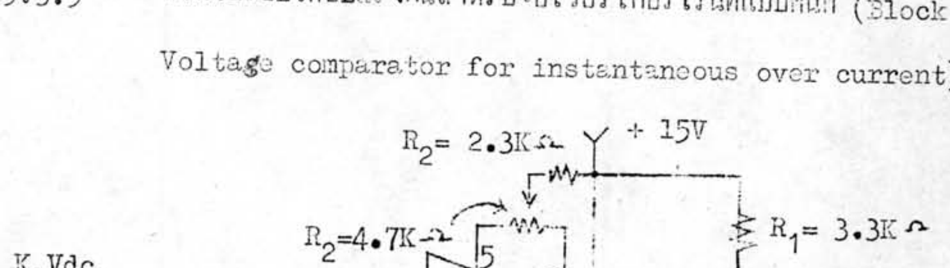
(2) วิธีทำ ใช้ออสซิลโลสโคปวัด V'_{dc} และ V_c เมื่อให้ V'_{dc} มีค่าเกิน V_{ref} V_c จะเริ่มเพิ่มขึ้นเข้าหาค่า V'_{dc} แล้วลองเปลี่ยนแปลงค่า V'_{dc} และ R_c

ใช้ดิจิตอลมัลติมิเตอร์จับดู V_{out} ว่ามีการเปลี่ยนสถานะไปเป็น +15 V. หรือไม่ การทดลองจับเวลาการทำงานของรีเลย์ จะทำในขั้นทดลองวงจรทั้งหมดร่วมกัน

(3) ผลการทดลอง

V_c เพิ่มขึ้น เร็ว ช้า ตามผลของ V'_{dc} และ R_c จริง คือ เมื่อให้ V'_{dc} สูง V_c จะเพิ่มเข้าหาค่า V'_{dc} เร็ว และเมื่อลดค่า R_c ลงต่ำ V_c จะเพิ่มเร็วเช่นกัน นั่นคือ ได้คุณลักษณะของการผันกลับที่สามารถเปลี่ยนได้ด้วย (Dial) ได้

5.3.5 ส่วนเปรียบเทียบแรงดันสำหรับโอเวอร์เคอร์เรนท์แบบทันที (Block Voltage comparator for instantaneous over current)



รูปที่ 5.26 รูปวงจรละเอียดของส่วนเปรียบเทียบแรงดันสำหรับโอเวอร์เคอร์เรนท์แบบทันที

5.3.5.1 วัตถุประสงค์

ให้ V_{out} มีค่าเป็น +15 V เมื่อ $K_I V_{dc}'$ มีค่าสูงถึง V_{ref}

5.3.5.2 การทำงานของวงจร

เมื่อ $K_I V_{dc}'$ มีค่า $\geq V_{ref}$ หมายถึง แรงดันที่ขา 2 ของไอซีเปรียบเทียบแรงดันนี้มีเท่ากับแรงดันที่ขา 3 V_{out} จะเปลี่ยนสถานะจาก 0V → + 15 V. โดยมีแรงดันที่ขา 5 และ 6 พอสมควร เพื่อให้ไอซีนี้ทำงานได้

5.3.5.3 ส่วนประกอบวงจร

- ค.ต.ท.ค่า 2.2 กิโลโอห์ม 1 ตัว
- ค.ต.ท.เปลี่ยนค่าได้ 4.7 กิโลโอห์ม 1 ตัว
- ค.ต.ท. 3.3 กิโลโอห์ม 1 ตัว
- ไอซี No. LM311 1 ตัว

5.3.5.4 การออกแบบวงจร

$K_I V_{dc}'$ ได้จากส่วนปรับรูปให้กระแสจากข้างต้นแล้ว ซึ่งจะให้ค่าที่ตั้งได้ตั้งแต่ 4 เท่าขึ้นไป (ยังคงใช้ V_{ref} = 1 โวลท์ดังเดิม)

ค.ต.ท. R_2 = 2.2 กิโลโอห์ม และ ค.ต.ท.เปลี่ยนค่าได้ P_2 = 4.7 กิโลโอห์ม ใช้เป็นสโตรป (Strobe) และบาลานซ์ (Balance) สำหรับไอซีนี้

ค.ต.ท. R_1 = 3.3 กิโลโอห์ม เป็นตัวผ่านสำหรับ +15 V.ซึ่งจะมีกระแสผ่าน

$$\frac{15V}{3.3\ K\Omega} = 4.5\ mA$$

5.3.5.5 การทดลองและผล

(1) เครื่องมือที่ใช้

- แหล่งจ่ายแรงดัน 2 ชุด
- ออสซิลโลสโคปชนิด 2 แกน
- ดิจิตอลมัลติมิเตอร์

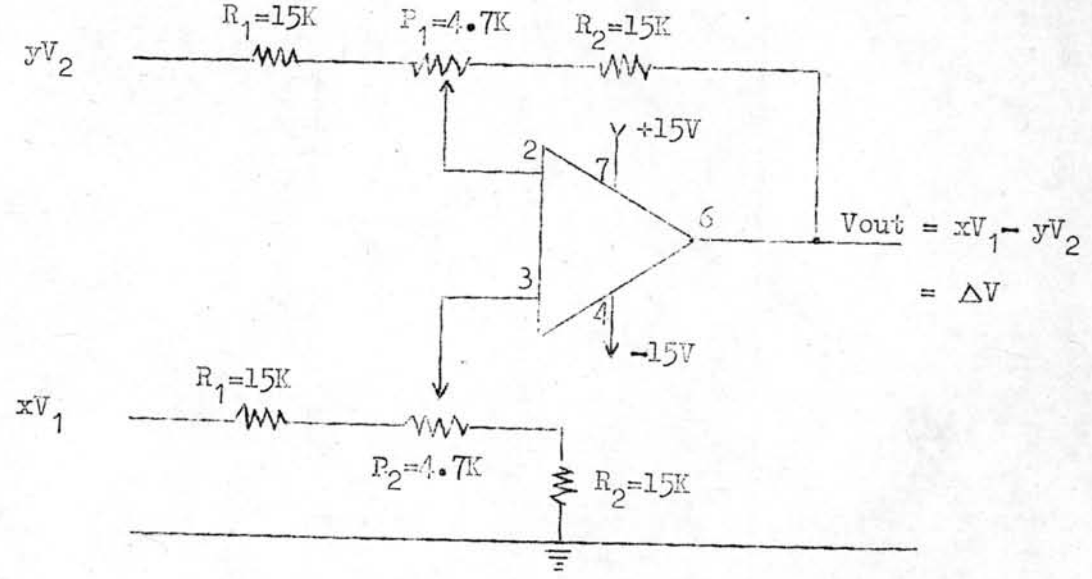
(2) วิธีทำ ใช้ออสซิลโลสโคปวัด $K_I V_{dc}'$ เทียบกับ V_{ref} และใช้ดิจิตอลมัลติมิเตอร์วัด V_{out}

เมื่อ $K_I V_{dc}'$ วัดได้ 2.1 ช่อง $\times \frac{1}{2}$ $\frac{\text{โวลท์}}{\text{ช่อง}}$ = 1.05 โวลท์

V_{out} จะเปลี่ยนสถานะอย่างสมบูรณ์

(ที่ 1 โวลท์พอดีการเปลี่ยนสถานะของไอซียังเป็นไปไม่สมบูรณ์)

5.3.6 ส่วนหักลบกัน (Block subtraction)



รูปที่ 5.27 รูปวงจรละเอียดของส่วนหักลบกัน

5.3.6.1 วัตถุประสงค์

เพื่อให้ได้แรงดันจากค่าแตกต่างของกระแส I_1 และ I_2 คือ XV_1 YV_2 เพื่อนำไปใช้งานให้วงจรชุดดิฟเฟอร์เรนเชียล (Differential unit) ทำงานต่อไป

5.3.6.2 การทำงานของวงจร

จากการใช้ไอซีออปแอมป์ (Operational amplifier integrated circuit) ต่อในรูปวงจรดิฟเฟอร์เรนเชียลฟีดแบกแอมปลิฟาย (Differential feedback amplifier) ดังอธิบายไว้ข้างต้นแล้ว จะได้แรงดัน $V_{out} = XV_1 - YV_2 = \Delta V$. เมื่อใส่แรงดัน XV_1 และ YV_2 ให้วงจร ตามรูปที่ 5.27

5.3.6.3 ส่วนประกอบวงจร

- ออปแอมป์ไอซี No. LM741 1 ตัว
- ค.ต.ท. 15 กิโลโอห์ม 4 ตัว
- ค.ต.ท. เปลี่ยนค่าได้ 4.7 กิโลโอห์ม 2 ตัว

5.3.6.4 การออกแบบ

ดังอธิบายรูปวงจรแบบนี้ไว้ข้างต้นแล้ว จะได้

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1}(XV_1 - YV_2)$$

เลือกใช้ ค.ต.ท. $R_2 = R_1 = 15$ กิโลโอห์ม เพื่อให้ $V_{out} = XV_1 - YV_2$ ตามต้องการ

ใช้ $P_1 = P_2 = 4.7$ กิโลโอห์มเพื่อปรับความสมดุลย์ของ ค.ต.ท. ที่อาจจะไม่เท่ากันได้

5.3.6.5 การทดลอง เพื่อวัดแรงดัน V_{out}

(1) เครื่องมือที่ใช้

- แหล่งจ่ายแรงดัน 2 ชุด
- ออสซิลโลสโกปชนิด 2 แกน
- แวริแอค (Variac)

(2) วิธีทำ วัดแรงดัน XV_1 และ YV_2 ที่ใส่ให้วงจร และวัด V_{out} โดยใส่แรงดัน $2V_{p-p}$ จากแวริแอค (Variac) เข้าไปหลังหม้อแปลง T_1 และ T_2 (ขนานกัน) ในส่วนรับกระแส (Interphase matching unit) ปรับ ก.ต.ท.เปลี่ยนค่าได้ 200 กิโลโอห์ม ที่ส่วนรับกระแสนั้นให้ $XV_1 = YV_1 = 200\ mV_{p-p}$

(3) ผล

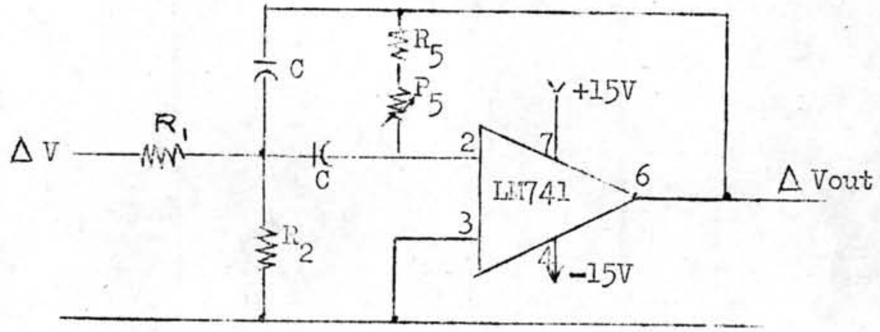
ได้ $\Delta V = V_{out} = XV_1 - YV_2 = 4\ mV_{p-p}$

คือประมาณ 2 % ของ XV_1 หรือ YV_2 เท่านั้น

ทดลองปรับค่า XV_1 จน ΔV เป็นศูนย์ได้

ลองเพิ่มแรงดันจากแวริแอคขึ้นไป ซึ่งหมายถึงการเพิ่มทั้ง XV_1 และ YV_2 ทั้งสองค่าพร้อมกัน จนถึง 10 V_{p-p} ยังคงมี ΔV ใกล้ศูนย์อยู่ ค่าจากออสซิลโลสโคป อ่านได้ต่ำกว่า 0.2 mV_{p-p}

5.3.7 ส่วนกรองความถี่เฉพาะผ่านแบบแอคตีฟ (Block band pass active filter)



รูปที่ 5.28 รูปวงจรละเอียดของส่วนกรองความถี่เฉพาะผ่านแบบแอคตีฟ

5.3.7.1 วัตถุประสงค์ เพื่อกรองแรงดัน Δ V ที่ได้จากกระแสแตกต่าง $I_1 - I_2$ ให้เฉพาะแรงดันที่มีความถี่ 50 Hz. และ 100 Hz. ผ่านออกไป

5.3.7.2 การทำงานของวงจร โดยการใช้ออปแอมป์ไอซี (Operational amplifier integrated circuit) ต่อในลักษณะอินฟินิทเกนมัลติเฟิลฟีดแบค (Infinite gain multiple feedback) เลือกส่วนประกอบวงจรต่าง ๆ ให้ทำหน้าที่เป็นวงจรกรองผ่านความถี่ผ่าน (Active band pass filter) ดังได้อธิบายไว้แล้ว

5.3.7.3 ส่วนประกอบวงจร

สำหรับ 50 Hz.
- ออปแอมป์ไอซี No. LM741 1 ตัว
- ตัวเก็บประจุค่า 0.1 μF 2 ตัว
- ตัวเก็บประจุค่า 0.033 μF 2 ตัว
- ก.ก.ท. ค่า 150 กิโลโอห์ม 1 ตัว
- ก.ก.ท.ค่า 1.5 กิโลโอห์ม 1 ตัว
- ก.ก.ท. ค่า 560 กิโลโอห์ม 1 ตัว

- ก.ต.ท. เปลี่ยนค่าได้ 100 กิโลโอห์ม 1 ตัว

สำหรับ 100 Hz.
- ออปแอมป์ไอซี No.LM741 1 ตัว
- ตัวเก็บประจุค่า 0.05 μF 2 ตัว
- ก.ต.ท.ค่า 3.3 กิโลโอห์ม 1 ตัว
- ก.ต.ท.ค่า 1.5 กิโลโอห์ม 1 ตัว
- ก.ต.ท. ค่า 560 กิโลโอห์ม 1 ตัว
- ก.ต.ท. เปลี่ยนค่าได้ 100 กิโลโอห์ม 1 ตัว

5.3.7.4 การออกแบบวงจร

สำหรับ 50 Hz.

ต้องการให้วงจรมีแบนด์วิดท์ (Band width) แคบ $\alpha = 0.1$

มีเกน (gain) เป็น 2 $H_o = 2$

จาก $\alpha \omega_o = \frac{2}{R_5 C}$

เลือกใช้ C $= 0.1 \mu F$

$\therefore 0.1 \times 2\pi \times 50 = \frac{2}{R_5 \times 0.1\mu}$

$R_5 = 636\ K\Omega$

จาก $H_o = \frac{R_5}{2R_1}$

$R_1 = \frac{636K}{2\times 2} = 159$ กิโลโอห์ม

ใช้ $R_1 = 150\ K\Omega$

จาก $\alpha = 2\sqrt{\frac{1}{R_5(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2})}}$

$$\frac{\alpha^2}{4} = \frac{1}{R_5\left(\frac{2H_o}{R_5} + \frac{1}{R_2}\right)} \qquad \left(H_o = \frac{R_5}{2R_1}\right)$$

$$\frac{4}{\alpha^2} = 2H_o + \frac{R_5}{R_2}$$

$$R_2 = \frac{R_5}{\left(\frac{4}{\alpha^2} - 2H_o\right)} = \frac{636\ K\Omega}{4(100 - 1)}$$

$$R_2 = 1.61 \text{ กิโลโอห์ม}$$

ใช้ $R_2 = 1.5$ กิโลโอห์ม

สำหรับ 100 Hz.

ต้องการให้วงจรมีแบนด์วิดท์ (Band width) แคบ $\alpha = 0.1$

มีเกนสูงกว่า 50 Hz. 5 เท่า $H_o = 10$

ซึ่งหมายถึงฮาร์โมนิคที่สอง (2nd harmonics) เป็น 20 % ของฟันดาเมนทอล (Fundamental)

จาก $\alpha\omega_o = \frac{2}{R_5 C}$

เลือกใช้ $C = 0.05\ \mu F$

$$0.1 \times 2\pi \times 100 = \frac{2}{R_5 \times 0.05\mu}$$

$$R_5 = 636 \text{ กิโลโอห์ม}$$

จาก $H_o = \frac{R_5}{2R_1}$

$$R_1 = \frac{636}{2 \times 10} = 31.8\ K\Omega$$

ใช้ $R_1 = 33\ K\Omega$

จาก $R_2 = \frac{R_5}{\frac{4}{\alpha^2} - 2H_o} = \frac{636\ K}{\frac{4}{(0.1)^2} - 2 \times 10}$

$= \frac{636\ K}{4(100-5)}$ 1.67 กิโลโอห์ม

ใช้ R_2 = 1.5 กิโลโอห์ม

5.3.7.5 การทดลอง

(1) เครื่องมือที่ใช้

- เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Signal generator)
- แหล่งจ่ายแรงดัน
- ออสซิลโลสโกปชนิด 2 แกน
- ดิจิตอลมัลติมิเตอร์

(2) วิธีทำ ใส่แรงดันรูปไซน์ (Sine wave) จากเครื่องกำเนิดสัญญาณ (Signal generator) เข้าไปในวงจร ใช้ออสซิลโลสโกปวัดค่าแรงดัน Δ V และ Δ V_{out}

(3) ผลการทดลอง

สำหรับ 50 Hz.

เนื่องจากตำแหน่งกลางของความถี่ (Center frequency) ที่ผ่านเลื่อนไปอยู่ที่ 63 Hz. จึงเพิ่มค่าตัวเก็บประจุอีก 0.033 μF รวมเป็น 1.033 μF และวัดค่า Δ V_{out} ที่ตำแหน่งความถี่ต่าง ๆ เมื่อใส่แรงดัน Δ V เข้าไปมีค่าเป็น $2V_{p-p}$ ดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 แรงดันที่ตำแหน่งความถี่ต่าง ๆ ซึ่งผ่านวงจรกรองย่านความถี่ 50Hz. ผ่าน

($V_{in} = 2 V_{p-p}$)

ความถี่ (Hz.)	แรงดัน $V_{out} (V_{p-p})$
35	0.6
40	0.95
44	1.6
46	2.3
48	3.1
49	3.0
50	2.7
52	2.0
70	0.5
100	0.26

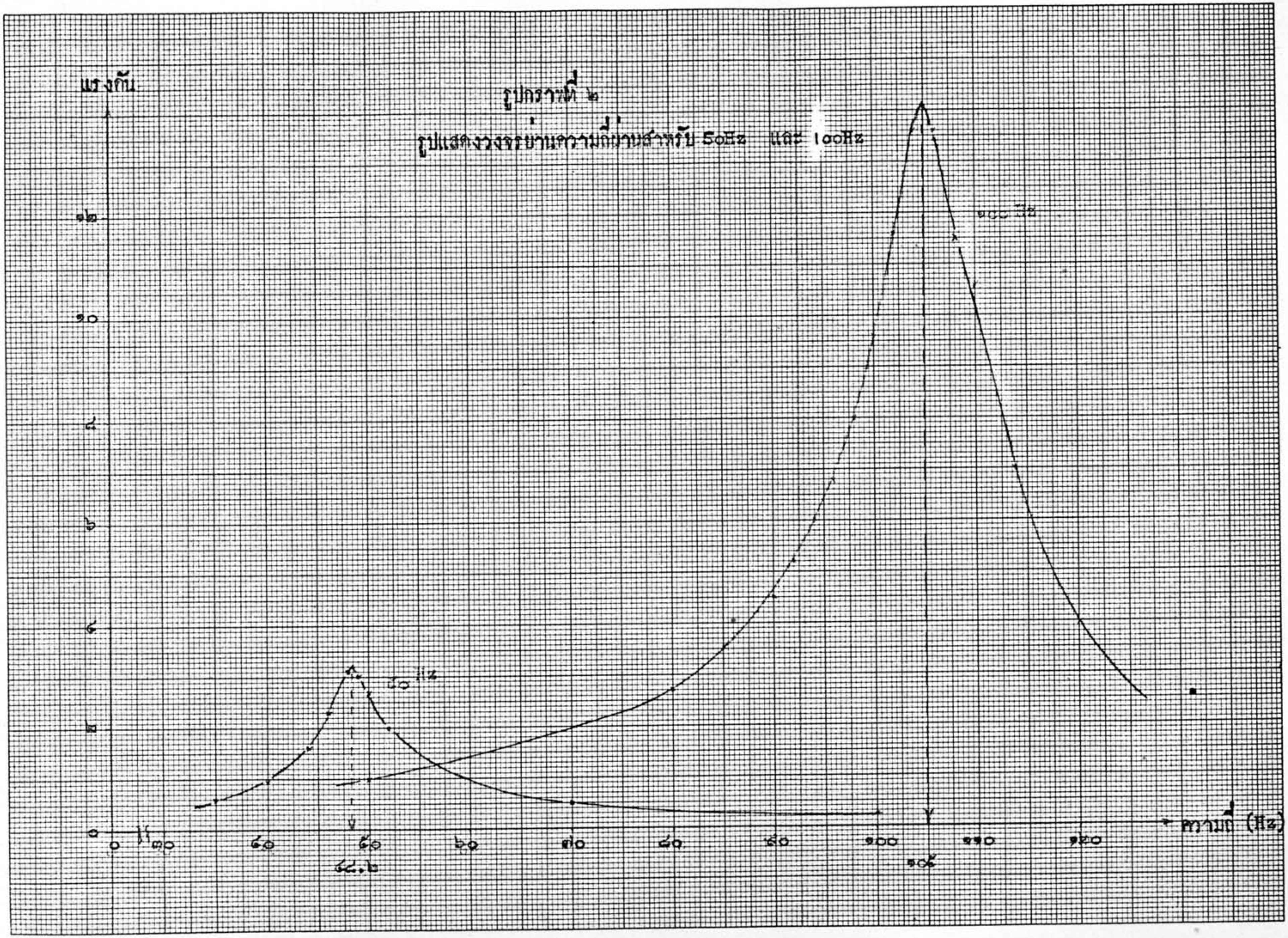
สำหรับ 100 Hz.

เมื่อให้แรงดัน Δ V ค่า 2 V_{p-p} เช่นกัน ได้ผล Δ V_{out} ที่ตำแหน่งความถี่ต่าง ๆ ดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 แรงดันที่ตำแหน่งความถี่ต่าง ๆ ซึ่งผ่านวงจรกรองย่านความถี่ 100 Hz. ผ่าน

(V_{in} = 2 V_{p-p})

ความถี่ (Hz.)	แรงดัน V_{out} (V_{p-p})
50	1.0
80	2.7
85	3.5
90	4.5
92	5.2
94	6.0
96	6.8
98	8.0
100	9.6
102	11.6
104	13.5
106	13.5
108	11.5
110	10.6
114	7.0
120	4.0


รูปกราฟที่ ๒
รูปแสดงวงจรย่านความถี่ผ่านสำหรับ 50Hz และ 100Hz
แรงดัน
ความถี่ (Hz)
๕๐ Hz
๑๐๐ Hz
๑๒
๑๐
๘
๖
๔
๒
๐
๐
๓๐
๔๐
๕๐
๖๐
๗๐
๘๐
๙๐
๑๐๐
๑๑๐
๑๒๐
๔๘.๒
๑๐๕

จากผลที่ได้เขียนเป็นรูปตามกราฟที่ 2 จะเห็นได้ว่าเป็นไปตามสัดส่วนที่ควรได้พอสมควร พิจารณาในกรณีที่มีแรงดันที่มีความถี่ 50 Hz. อยู่ 100 % รวมอยู่กับแรงดันที่มีความถี่ 100 Hz. (เป็นฮาร์โมนิกที่สอง) คิดเป็น x % แล้วแรงดันที่ได้จากวงจรที่ให้ 50 Hz. ผ่านมีค่าเป็น V_o

$$V_o = \frac{2.7}{2} \times 100\,\% + \frac{0.26}{2} \times x\,\%$$

แรงดันที่ได้จากวงจรที่ให้ 100 Hz. ผ่านมีค่าเป็น V_2

$$V_2 = \frac{9.6}{2} \times x\,\% + \frac{1.0}{2} \times 100\,\%$$

จุดที่จะไม่ให้รีเลย์ทำงาน คือ

$$V_o = V_2$$

$$\frac{2.7}{2} \times 100\,\% + x\,\% \times \frac{0.26}{2} = \frac{9.6}{2} x\,\% + \frac{1.0}{2} \times 100\,\%$$

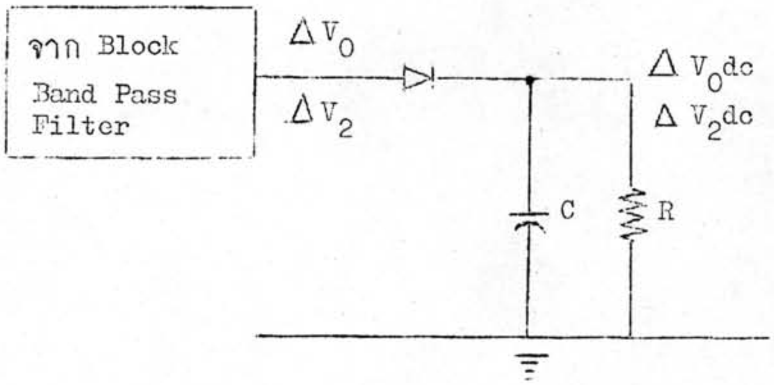
$$x = 18.2\,\%$$

ดังนั้น แรงดันที่ประกอบด้วยฮาร์โมนิคที่สอง ตั้งแต่ 18.2 % ขึ้นไปแล้วรีเลย์จะไม่ทำงาน

5.3.8 ส่วนเรียงกระแสและกรองเรียบ (Block rectifier and filter)

5.3.8.1 วัตถุประสงค์

จะเรียงแรงดันที่ผ่านจากวงจรกรองย่านความถี่ผ่านแบบแอคตีฟ (Active band pass filter) ให้เป็นแรงดันทางเดียว เพื่อนำไปเปรียบเทียบระหว่าง ΔV_{odc} และ ΔV_{2dc} เป็นคุณลักษณะฮาร์โมนิกเรสเทรนท์ (Harmonics restraint)



รูปที่ 5.29 วงจรละเอียดของส่วนเรียงกระแสและกรองเรียบ

สำหรับรีเลย์ และเปรียบเทียบ ΔV_{odc} กับบางส่วนของ V'_{dc} ($K_d V'_{dc}$) เป็นคุณลักษณะเปอร์เซ็นต์ไบอัสของรีเลยแบบดิฟเฟอร์เรนเชียล (Percent bias differential relay)

5.3.8.2 **การทำงาน**ของวงจร

ใช้ไดโอด (Diode) หนึ่งตัวทำฮาล์ฟเวฟเร็คติฟาย (Half wave rectifier) เนื่องจากจะต้องนำแรงดันจากเร็คติฟายนี้เปรียบเทียบกับ V'_{dc} บนจุดร่วม (Common) เดียวกัน จึงใช้เพียงฮาล์ฟเวฟเร็คติฟาย ความเรียบของแรงดัน ไม่จำเป็นต้องสูงมาก ใช้ทำให้เรียบด้วยตัวเก็บประจุ และ ก.ต.ท. ตามรูปที่ 5.29

5.3.8.3 การออกแบบและ**ส่วน**ประกอบวงจรที่ใช้

ใช้ไดโอด (Diode) No.OA202 ทำฮาล์ฟเวฟเร็คติฟาย

สำหรับ 50 Hz.

ใช้กรองแรงดันด้วยตัวเก็บประจุค่า 10 μF และ ก.ต.ท. 15 กิโลโอห์ม เพราะแรงดัน ΔV_{odc} นี้จะเป็นค่าสำหรับทำงาน ไม่จำเป็นต้องเรียบนัก

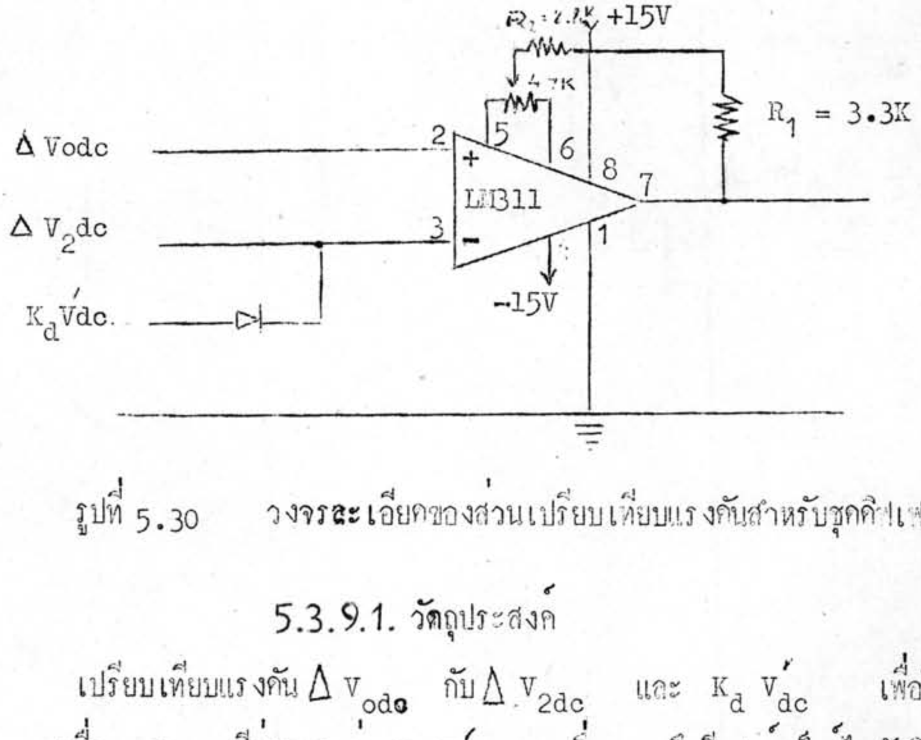
สำหรับ 100 Hz.

ใช้ตัวเก็บประจุ 10 μF เช่นกัน แต่เพิ่มค.ต.ท.เป็น 22 กิโลโอห์ม เพื่อให้ ΔV_{2dc} เรียบมากกว่า เนื่องจากจะต้องเป็นแรงดันที่ต้าน ΔV_{odc} ให้ได้ตลอดทุก ๆ ขณะ (ΔV_{2dc} มีความถี่มากกว่า ΔV_{odc} อีก 1 เท่าตัว)

5.3.8.4 การทดลองและผล

เครื่องมือที่ใช้เหมือนการทดลองที่ผ่านมาโดยใช้ออสซิลโลสโคปชนิด 2 แกน วัดดูแรงดัน ΔV_{odc} และ ΔV_{2dc} เมื่อใส่แรงดัน ΔV เข้าวงจรสูง, ΔV_{odc} และ ΔV_{2dc} ที่ได้จะมีริพเพิล (Ripple)บ้าง ซึ่ง ΔV_{2dc} จะเรียบกว่า และเนื่องจากความถี่สูงกว่าจะสามารถกัน ΔV_{odc} ได้ทุก ๆ ขณะ

5.3.9 ส่วนเปรียบเทียบแรงดันสำหรับชุดดิฟเฟอร์เรนเชียล (Block voltage comparator for differential unit)



รูปที่ 5.30 วงจรละเอียดของส่วนเปรียบเทียบแรงดันสำหรับชุดดิฟเฟอร์เรนเชียล

5.3.9.1. วัตถุประสงค์

เปรียบเทียบแรงดัน ΔV_{odc} กับ ΔV_{2dc} และ $K_d V'_{dc}$ เพื่อให้ได้ V_{out} เมื่อ ΔV_{odc} มีค่ามากกว่า $K_d V'_{dc}$ ซึ่งหมายถึงมีเปอร์เซ็นต์ไบอัสดิฟเฟอร์เรนเชียล (Percent bias differential) และ ΔV_{odc} ต้องมีค่ามากกว่า ΔV_{2dc} ด้วย ซึ่งหมายถึงมีฮาร์โมนิคเรสเทรนท์ (Harmonics restraint) อยู่ด้วย

5.3.9.2 **การทำงานของวงจร**

ใช้ไอซีเปรียบเทียบแรงดัน (Voltage comparator integrated circuit) ทำหน้าที่เปรียบเทียบดังกล่าว โดยใส่แรงดัน ΔV_{odc} ที่ขาบวก (ขา 2) และใส่แรงดัน ΔV_{2dc} และ $K_d V'_{dc}$ ที่ขาลบ (ขา 3) V_{out} จะเปลี่ยนไปเป็น +15 V. เมื่อแรงดันที่ขาบวก (ขา 2) มากกว่าแรงดันที่ขาลบ (ขา 3) ของไอซีนี้[7]

5.3.9.3 ส่วนประกอบวงจร

- ไอซี No. LM311 1 ตัว
- ไดโอด No. OA202 1 ตัว
- ค.ต.ท.ค่า 3.3 กิโลโอห์ม 1 ตัว
- ค.ต.ท.ค่า 2.4 กิโลโอห์ม 1 ตัว
- ค.ต.ท.เปลี่ยนค่าได้ 4.7 กิโลโอห์ม 1 ตัว

5.3.9.4 การออกแบบวงจร

แรงดัน $K_d V'_{dc}$ ได้จากวงจรส่วนปรับรูปให้กระแส (Shaper and current source) ดังได้อธิบายไว้ข้างต้นแล้ว เนื่องจากไม่ต้องการให้แรงดัน ΔV_{2dc} ไปเกี่ยวข้องกับ $K_d V'_{dc}$ จึงใช้ไดโอด (Diode) ต่อตามรูปที่ 5.30 ไดโอดที่ใช้เป็น No. เดียวกันกับที่ใช้เร็กติฟายคลื่น 100 Hz. เพื่อให้ได้คุณลักษณะที่ใกล้เคียงกัน และทั้งยังเป็น ค.ต.ท.สูงสำหรับวงจรกรองเรียบของ ΔV_{2dc} ด้วย ไดโอดที่ใช้มีค่าแรงดันตกคร่อมประมาณ 0.5 V. ที่กระแส 100 mA. ดังนั้นค่า ค.ต.ท. 22 กิโลโอห์มในวงจรกรองเรียบของคลื่น 100Hz. ต้องคำนึงถึงด้วย

---

[7]Phillips Data Handbook. <u>Semiconductor and Integrated Circuit</u>. Part 13 Dec. 1972.

ค.ต.ท. R_1 = 3.3 กิโลโอห์มเป็นทางให้กระแสไหลผ่าน ซึ่งจะมีค่าประมาณ 5 mA (= $\frac{15V}{3.3 K\Omega}$)

ค.ต.ท. R_2 = 2.4 กิโลโอห์ม และ ค.ต.ท.เปลี่ยนค่าได้ 4.7 กิโลโอห์ม ทำหน้าที่ให้ไอซี (I.C.)ตัวนี้ทำงานได้โดยสมดุลย์

5.3.9.5 การทดลองและผล

(1) เครื่องมือที่ใช้

- แหล่งจ่ายแรงดัน
- เครื่องกำเนิดสัญญาณ
- ออสซิลโลสโคปชนิด 2 แกน
- ดิจิตอลมัลติมิเตอร์

(2) การทดลองและผล

เมื่อใส่ให้แรงดัน ΔV_{odc} มีค่ามากกว่า $K_d V'_{dc}$ จะได้ V_{out} เป็น +15 V. จริง หมายถึงรีเลย์มีคุณสมบัติเปอร์เซ็นต์ไบอัส ซึ่งจะตั้งได้

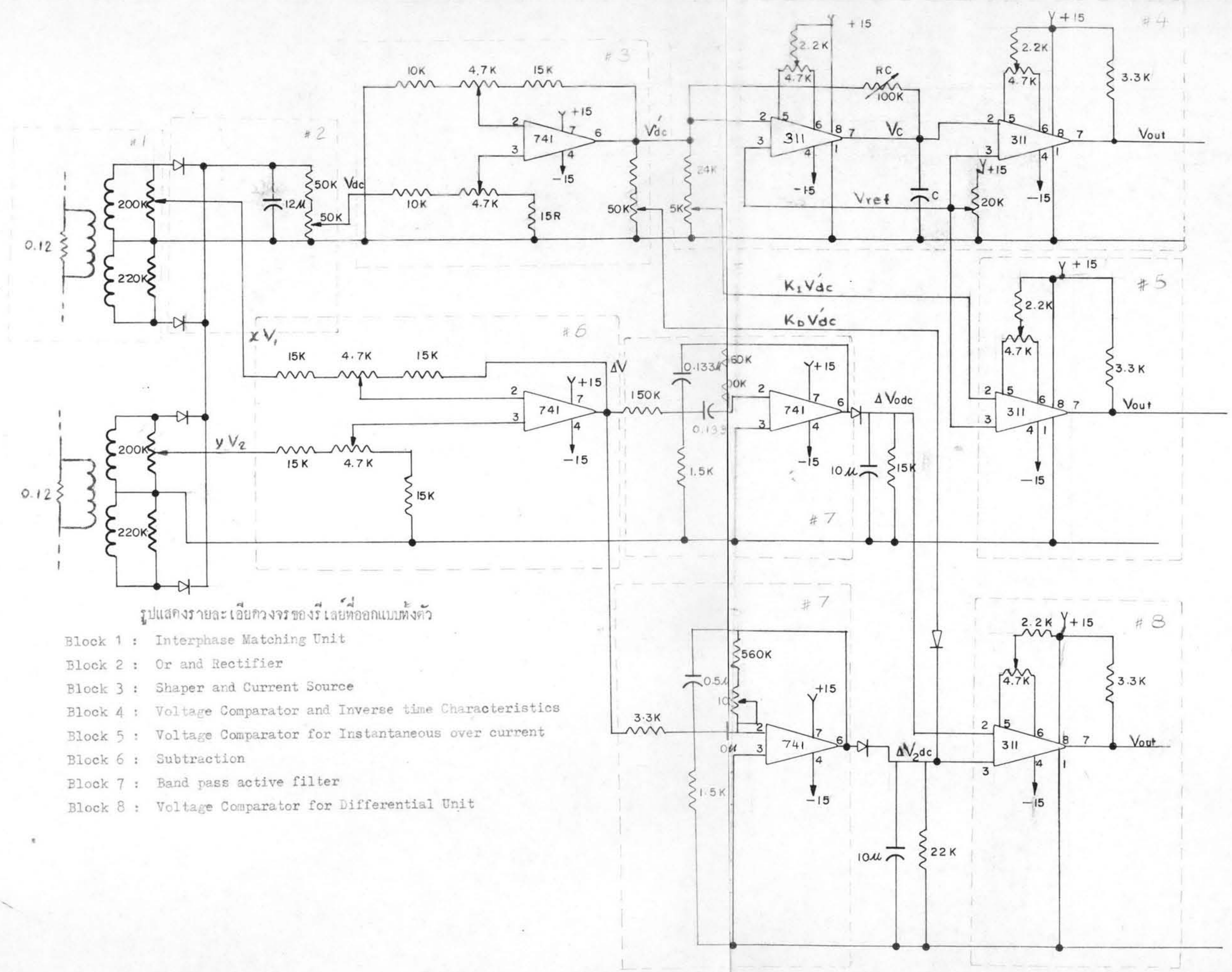
การทดลองโดยสมบูรณ์จะประกอบด้วย

- จุดเริ่มต้นทำงานของรีเลย์
- คุณสมบัติเปอร์เซ็นต์ไบอัส (Percent bias)
- คุณสมบัติฮาร์โมนิกเรสเทรนท์ (Harmonics restraint)

จะทำการทดลองในช่วงทดลองรีเลย์ทั้งตัวโดยพร้อมกันต่อไป

5.4 การทดลองรีเลย์ที่ออกแบบ

นำรีเลย์ที่ได้ออกแบบและทดลองมาแล้วในแต่ละส่วน มาประกอบรวมกันเป็นตัวรีเลย์ที่ให้การทำงานตามวัตถุประสงค์ในข้อ 5.1



รูปแสดงรายละเอียดวงจรของรีเลย์ที่ออกแบบทั้งตัว

Block 1 : Interphase Matching Unit

Block 2 : Or and Rectifier

Block 3 : Shaper and Current Source

Block 4 : Voltage Comparator and Inverse time Characteristics

Block 5 : Voltage Comparator for Instantaneous over current

Block 6 : Subtraction

Block 7 : Band pass active filter

Block 8 : Voltage Comparator for Differential Unit

5.4.1 วัตถุประสงค์

ทำการทดลองรีเลย์ที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นมานี้ โดยการใส่กระแสเพื่อดูลักษณะการทำงานของรีเลย์ในหน้าที่ 3 แบบ คือ

(1) โอเวอร์เคอร์เรนท์แบบผันกลับ (Inverse time over current)

(2) โอเวอร์เคอร์เรนท์แบบทันที (Instantaneous over current)

(3) ดิฟเฟอร์เรนเชียล (Differential current)

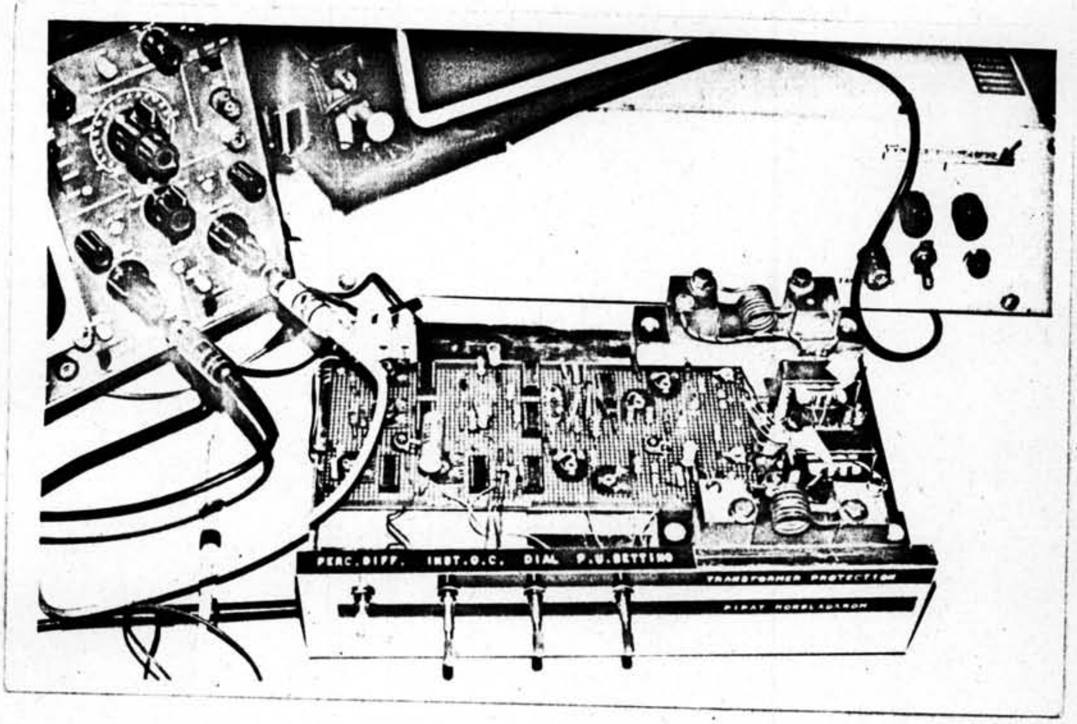
<u>ข้อสังเกต</u>

รีเลย์นี้ยังไม่มีวงจรที่ให้คอนแทค (Contacts)ออกไปทำงานจริง เนื่องจากเป็นเพียงการทดลองหาการทำงานของรีเลย์เท่านั้น V_{out} ที่ได้ของส่วนใดเป็นการแสดงว่ารีเลย์ส่วนนั้นได้ทำงานแล้ว ซึ่งจะได้แรงดันเปลี่ยนแปลงจาก 0 → +15 V. ถ้าจะนำรีเลย์นี้ใช้งานจริงควรเพิ่มส่วนสำหรับให้การทำงานออกไปให้เหมาะสมกับระบบ เช่น อาจเป็นคอนแทคพร้อมสัญญาณการทำงานเฉพาะส่วนได้โดยไม่ยุ่งยากนัก

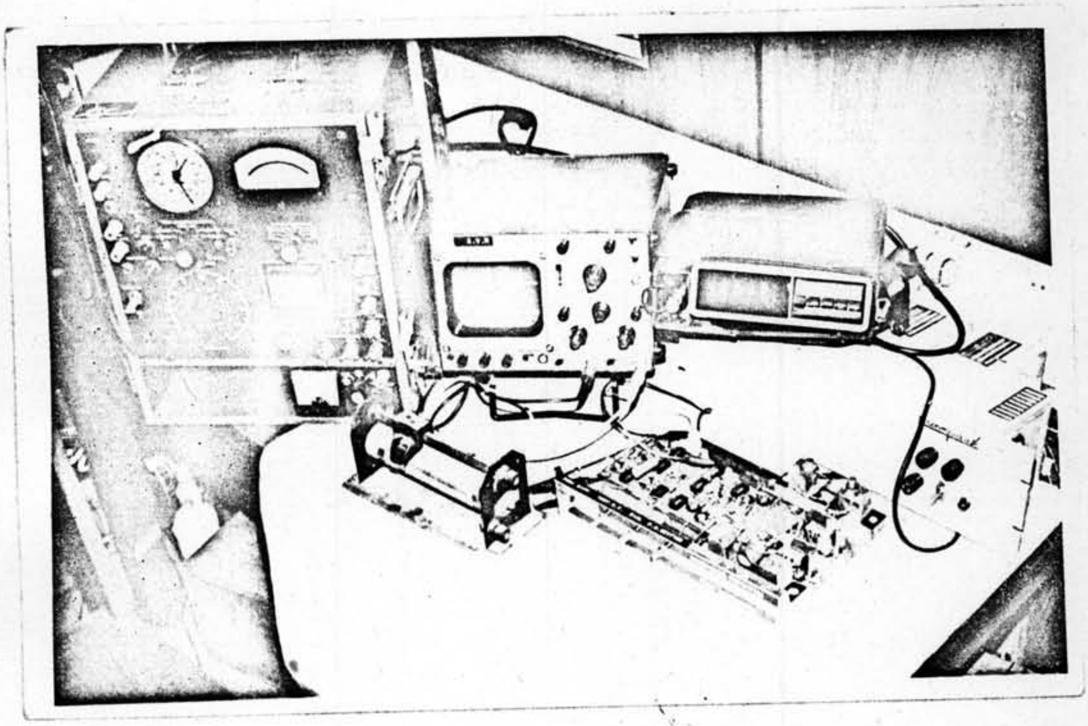
5.4.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- เครื่องกำเนิดกระแส 1 ตัว
- ออสซิลโลสโคปชนิด 2 แกน 1 ตัว
- แอมมิเตอร์ 2 ตัว
- ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 1 ตัว
- รีโอสแตต 2 ตัว (Rheostat)

5.4.3 วิธีทำการทดลองเพื่อตั้งค่าต่าง ๆ และผล



รูปที่ ๕.๓๑ สแตติกรีเลย์สำหรับการป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้า

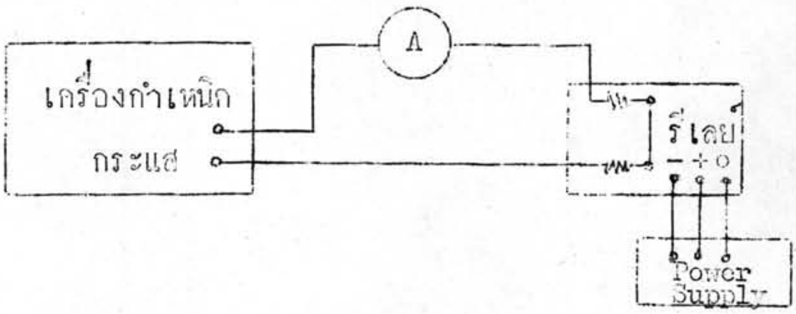


รูปที่ ๕.๓๒ สแตติครีเลย์พร้อมเครื่องมือในการทดลอง

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.4.3.1 ทดลองหน้าที่โอเวอร์เคอร์เรนท์แบบผันกลับ

รูปแบบการทดลองเป็นตามรูปที่ 5.33



รูปที่ 5.33 รูปแบบสำหรับทดลองโอเวอร์เคอร์เรน

(1) ใส่กระแสจากเครื่องกำเนิดกระแสเข้าตัวรีเลย์ ที่ตำแหน่งตัว ค.ต.ท. ค่า 0.12 โอห์ม โดยต่ออนุกรมกันทั้ง 2 ตัว

(2) ปรับให้กระแสไหลเป็นปริมาณเท่ากับที่ต้องการตั้ง (set) ซึ่งจะมีที่ตำแหน่งของกระแส 4A-5A-6A-7A-8A-9A & 10A

(3) ปรับ V_{ref} = 1 V.

(4) วัด V_{dc} ปรับ ค.ต.ท.ที่เปลี่ยนค่าได้ เพื่อตั้งค่าเริ่มทำงาน (Pick up value) ที่ตำแหน่งกระแสต่าง ๆ ตามข้อ (2) แสดงไว้เป็น "p.u. setting"

(5) ใช้ออสซิลโลสโคปวัดดู V_c ว่ามีค่าเพิ่มขึ้นหรือไม่ ที่จุดเริ่มทำงาน V_c จะเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้น (ปรับให้เป็นเช่นนั้น) จะได้ตำแหน่งที่ตั้งสำหรับให้รีเลย์เริ่มทำงานที่กระแสต่าง ๆ ตามข้อ (2)

เนื่องจาก ค.ต.ท. เปลี่ยนค่าได้สำหรับการตั้ง ค่าเป็นลอกการิทึม (Logarithm) ทำให้ช่วงกระแสมาใกล้กันมาก จึงตั้งเพียงค่า 4A-5A-6A-8A & 10A

(6) ตั้งรีเลย์ไว้ที่ตำแหน่งเริ่มทำงาน 5A

(7) ใส่กระแส 10 A = 2 x 5A (2 เท่าค่าเริ่มทำงาน)

(8) ปรับ ค.ต.ท.เปลี่ยนค่าได้ R_c เพื่อหาตำแหน่งการตั้งเวลาในการทำงานหรือไดอัล (Dial setting) ของรีเลย์

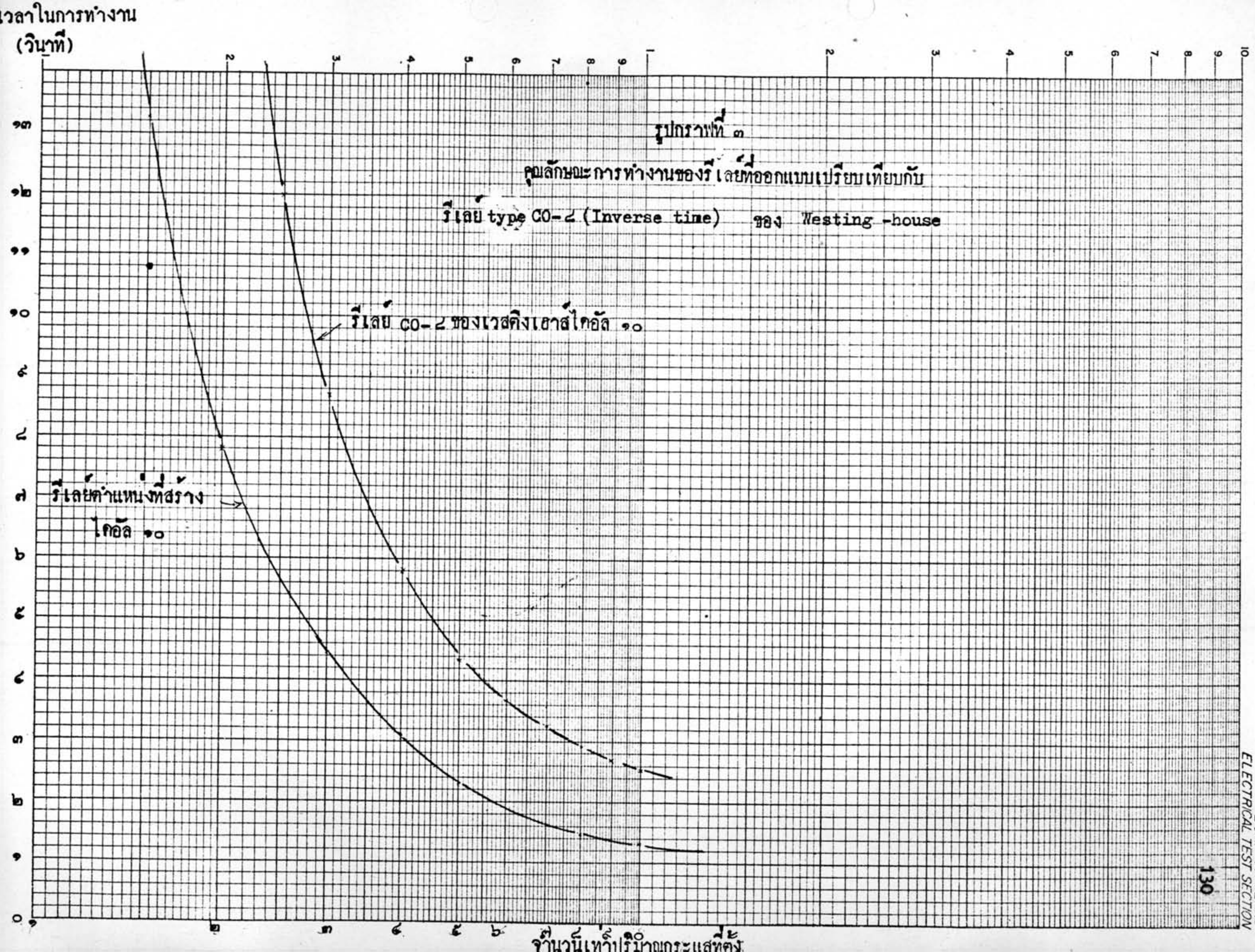
(9) ทำการทดลองให้การทำงานของรีเลย์ได้นาน 8 sec. โดยใช้การสั่งหยุดการจับเวลาด้วยตัวเอง เมื่อเห็น V_{out} เปลี่ยนจาก 0 V → +15 V. ในออสซิลโลสโคป ดังนั้นค่าที่ได้อาจผิดพลาดได้บ้าง ตำแหน่งนี้คือตำแหน่งไดอัล 10

(10) ทำการทดลองเช่นนี้ที่กระแส 10 A เช่นเดิม แต่ทำการปรับ R_c เพื่อให้เวลาการทำงานของรีเลย์เป็น 7.2 sec. (0.9 x 8) - 6.4 sec. (0.8 x 8) - 5.6 sec. - 4.8 sec. - 4.0 sec. - 3.2 sec. - 2.4 sec. - 1.6 sec. และ 0.8 sec. ซึ่งหมายถึงการตั้งไดอัล 9-8-7-6-5-4-3-2-1 ตามลำดับ แต่เนื่องจากสาเหตุเช่นเดิมจึงตั้งค่าไดอัลเพียง 1-2-3-4-5 & 10

(11) ตั้งรีเลย์ที่ 5A ไดอัล 10 ทดลองการทำงานที่กระแสต่าง ๆ ตามตารางที่ 5.7

กระแส (แอมป์)	เวลาในการทำงาน (sec.)
5A x 1.1 = 5.5	43.15
5 x 1.5 = 7.5	13.25
5 x 2 = 10	7.8
5 x 3 = 15	4.45
5 x 4 = 20	3.12
5 x 8 = 40	1.46
5 x 10 = 50	1.31

ตารางที่ 5.7 เวลาในการทำงานที่กระแสต่าง ๆ ของรีเลย์โอเวอร์เคอร์เรนแบบผันกลับ


รูปกราฟที่ ๓
คุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ที่ออกแบบเปรียบเทียบกับ
รีเลย์ type CO-๘ (Inverse time) ของ Westing -house
รีเลย์ CO-๘ ของเวสติงเฮาส์ไคอัล ๑๐
รีเลย์ตำแหน่งที่สร้าง
ไคอัล ๑๐
เวลาในการทำงาน
(วินาที)
จำนวนเท่าปริมาณกระแสที่ตั้ง
FORM TR 67
EGAT THAILAND
ELECTRICAL TEST SECTION

เขียนเป็นรูปแสดงคุณสมบัติได้ตามรูปกราฟที่ 3 เป็นลักษณะคุณสมบัติผันกลับโดยตรง (Linear inverse) ดังจะเปรียบเทียบได้จากคุณสมบัติของอีเลคโทรเม็คคานิเคิล (Electromechanical) รีเลย์ที่ทำจากบริษัทเวสติ้งเฮาส์ ชนิดผันกลับโดยตรงเช่นกันที่เขียนไว้ในรูปกราฟที่ 3 เดียวกันด้วย

เวลาที่ใช้ในการคืนกลับ (Reset time) ของรีเลย์ จะขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสที่มากนั้น ทำให้ V_c เกินค่า V_{ref} อยู่เท่าใดและนานเท่าใด เพราะยิ่งกระแสมาก V_c จะเพิ่มสูงและเร็ว ซึ่งเมื่อรีเลย์ทำงานแล้ว ถ้ากระแสหายไปทันทีเบรคเกอร์ (Breaker) ถูกทริพ (Trip) ออก V_c จะลดลงจากค่าสูงสุดขณะนั้น ในรูปเอ็กซ์โปเนนเชียล ซึ่งมีไทม์คอนสแตนท์ (Time constant) เป็น (R_c ที่ตั้งไว้ + ก.ต.ท. ค่า 29 K ขนาน ก.ต.ท. 50 K) x C จนถึงกับ V_{ref} แล้วจะถูกช็อต (Short) อย่างเร็วด้วยไอซี (Integrated Circuit)

ได้ทำการทดลองโดยพยายามจับเวลาต่อหลังจากรีเลย์ทำงาน แล้วตัดกระแสออกทันที และดูเวลาที่ V_{out} ลดลงจาก +15V → 0V. ได้เวลาในการคืนกลับประมาณ 1.3 sec. ซึ่งก็ยังคงเป็นเวลาที่สั้นกว่าอีเลคโทรเม็คคานิเคิลแบบใช้จาน

5.4.3.2 ทดลองหน้าที่ของโอเวอร์เกอร์เรนท์แบบทันที

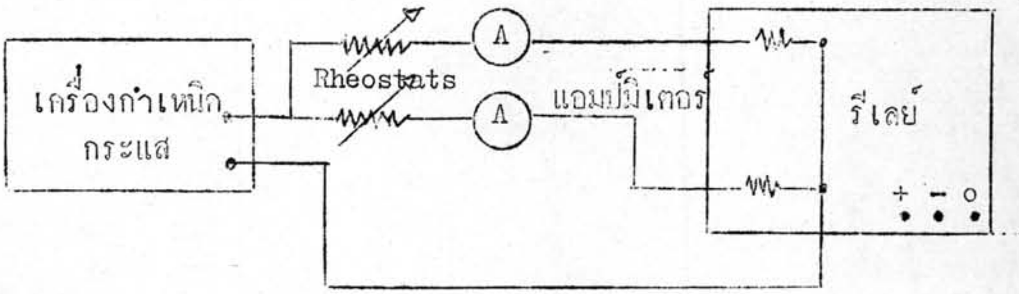
รูปแบบการทดลองยังคงเป็นรูปที่ 5.3.3

(1) ใส่กระแส 20A (= 4 x 5A) เข้ารีเลย์

(2) ปรับตัว ก.ต.ท. เปลี่ยนค่าได้ให้ได้ $K_I V_{dc}'$ สูงพอ ก.ต.ท. นี้เป็นตัวตั้ง (Inst. O.C.) ให้ได้ V_{out} จาก 0V → +15V ตำแหน่งนี้หมายถึงตั้งให้รีเลย์ทำงานที่สี่เท่า ค่า p.u. Setting

(3) ทำการทดลองเช่นเดิม โดยเปลี่ยนค่ากระแสไป เพื่อหาตำแหน่งการทำงานของรีเลย์ที่ 4-5-6-8 - 10 เท่าของ p.u. setting

5.4.3.3 ทดลองหน้าที่ดิฟเฟอร์เรนเชียล (Differential)



รูปที่ 5.34 รูปแบบสำหรับทดลองหน้าที่ดิฟเฟอร์เรนเชียล

(1) จากรูปแบบการทดลองตามรูป 5.33 เมื่อใส่กระแส 5A แล้วปรับให้ $V_2 = 0$ และปรับ V_1 จนได้ $\Delta V_{odc} = 0.4$ V.

(2) ปรับ V_2 เพิ่มขึ้นจนได้ $\Delta V = 0$ V.

(3) เปลี่ยนรูปแบบการทดลองเป็นดังรูปที่ 5.34

(4) ทดลองหาค่ากระแสต่ำที่สุดที่ดิฟเฟอร์เรนเชียลทำงาน (Minimum pick up current) โดยใส่กระแสผ่าน ค.ต.ท. 0.12 โอห์มเพียงตัวเดียว

ได้ค่ากระแสน้อยที่สุด = 1.28 A = 25.6 % ของ 5A

(5) ทดลองหาเปอร์เซ็นต์สโลป (Percent slope) โดยปรับรีโอสแตต (Rheostats) ให้กระแสเป็น 10A และ 8A ไหลผ่าน ค.ต.ท. 0.12 โอห์มแต่ละตัว นั่นคือจะมีกระแสแตกต่าง = 2 A ซึ่งเป็น 20 % ของ 10A (Percent slope = 20 %) ปรับ ค.ต.ท. เปลี่ยนค่าได้ ซึ่งเป็นตัวสำหรับตั้ง "Percent bias" ให้รีเลย์ทำงานจะได้ค่าเป็นตำแหน่ง 20 %

(6) ทำการทดลองเช่นเดิม โดยปรับให้ได้ค่าเป็น 30% - 40 % และ 50 %

(7) ตั้งรีเลย์ที่ "Percent bias"20% ทดลองที่กระแสต่างๆ ตามตารางที่ 5.8

กระแส (แอมป์)	กระแสแตกต่าง (แอมป์)	เปอร์เซ็นต์สโลป (%)
5	1.34	26.7
6	1.42	23.7
8	1.68	21.0
10	2.0	20
12	2.39	19.9

ตารางที่ 5.8 ลักษณะการทำงานของดิฟเฟอร์เรเชียลที่กระแสต่าง ๆ

ดังแสดงรูปไว้ในกร๊าฟที่ 4

(8) ทำการทดลองตามข้อ 3.7 โดยเปลี่ยนเปอร์เซ็นต์สโลป เป็น 40 % ได้ผลตามตารางที่ 5.9

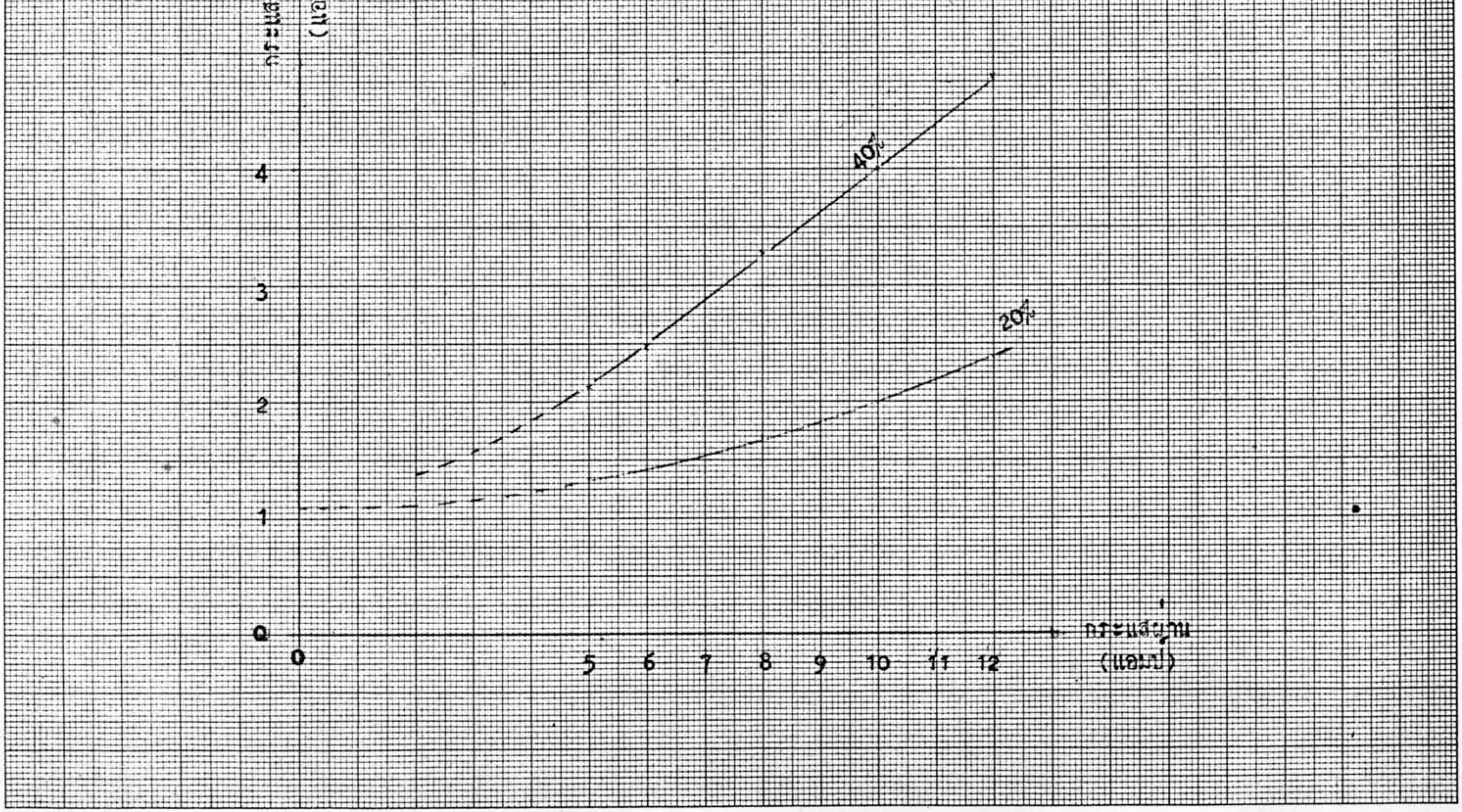
กระแส (แอมป์)	กระแสแตกต่าง (แอมป์)	เปอร์เซ็นต์สโลป (%)
5	2.12	42.4
6	2.49	41.5
8	3.27	40.4
10	4.0	40
12	4.81	40

ตารางที่ 5.9 ลักษณะการทำงานของดิฟเฟอร์เรนเชียลที่กระแสต่าง ๆ

KEUFFEL & ESSE

รูปกราฟที่ ๓

คุณสมบัติของ Percent bias Differential ที่ ๒๐% และ ๔๐%



แสดงรูปไว้ในกราฟที่ 4

(9) ทดลองหน้าที่ฮาร์โมนิกเรสเทรนท์ (Harmonics - restraint) โดยอาศัยจากการทำฮาล์ฟเวฟเร็กติฟาย (Half wave rectifier) ของกระแสสลับความถี่ 50 Hz. ซึ่งทราบว่าจะมีกระแสความถี่ 100 Hz. ประกอบอยู่ 47 % ของค่าเฉลี่ย [8] คือ ถ้าวัดกระแสตรง I_{dc} (คือค่าเฉลี่ย) เป็น 100 % จะมีกระแสความถี่ 100 Hz. อยู่ 47 % และมีกระแสความถี่ 50 Hz. อยู่ 111 % ซึ่งจะเขียนเป็นสูตรได้ดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ของฮาร์โมนิกที่สอง} = \frac{0.47\ I_{dc}}{1.11\ I_{dc}} \times 100\ \%$$

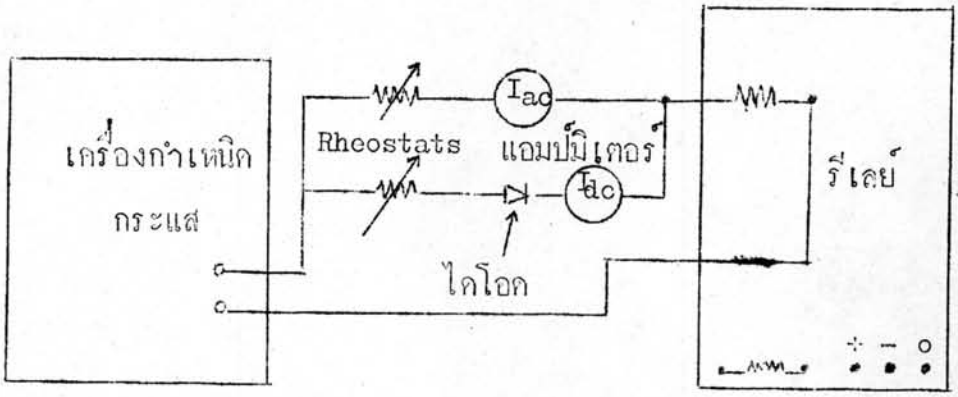
โดยการใส่กระแสความถี่ 50 Hz. เข้าไปอีกส่วนหนึ่งต่างหาก วัดเป็น I_{ac} จะได้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ของฮาร์โมนิกที่สอง} = \frac{47\ I_{dc}}{I_{ac}+1.11\ I_{dc}}\ \%$$

โดยการต่อวงจรตามรูปที่ 5.35 โดยเพิ่มไดโอด (Diode) อีกหนึ่งตัว

---

8 Westinghouse I.L. 41 - 347.1 J. <u>Instruction Type HU and HU -1 Transformer Differential Relays</u>. p. 18.



รูปที่ 5.35 รูปแบบสำหรับการทดลองฮาร์โมนิคเรสเทรนท์

ปรับให้ $I_{dc} = 5$ A

ทดลองหา I_{ac} ที่ทำให้รีเลย์ทำงานได้

$I_{ac} = 8.7$ A.

จากสูตรข้างต้นคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของฮาร์โมนิคที่สองได้เป็น

$$\text{เปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิคที่สอง} = \frac{47 \times 5}{8.7+1.11 \times 5}$$

$$= 16.49\ \%$$

5.5 ประมาณราคาของสแตติกรีเลย์ที่ออกแบบสร้าง

เป็นการประมาณราคาเฉพาะส่วนประกอบวงจรที่ใช้สร้างขึ้นเท่านั้น ดังมีรายการต่อไปนี้

ก.	ความต้านทานในวงจรหม้อแปลงกระแส (ค่า 0.12 Ω) 2 ตัว ราคา	100	บาท
ข.	หม้อแปลงแรงดัน 2 ตัว ราคา	28	บาท
ค.	ความต้านทาน $\frac{1}{2}$ W, 5 % 28 ตัว ราคา	21	บาท
ง.	ความต้านทานเปลี่ยนค่าได้ขนาดเล็ก 13 ตัว ราคา	35	บาท
จ.	ความต้านทานเปลี่ยนค่าได้สำหรับตั้งค่า 4 ตัว ราคา	16	บาท
ฉ.	ตัวเก็บประจุขนาดต่าง ๆ 10 ตัว ราคา	30	บาท
ช.	Diode No. 1N 3253 4 ตัว ราคา	100	บาท
ซ.	Diode No. OA 202 3 ตัว ราคา	24	บาท
ฌ.	I. C. No. LM 741 3 ตัว ราคา	84	บาท
ญ.	I. C. No. LM 311 4 ตัว ราคา	360	บาท
ฎ.	Socket I. C. 7 ตัว ราคา	98	บาท
ฏ.	Stripboard type B 43 - 382 - 6 1 แผ่น ราคา	90	บาท
ฐ.	ฐานอลูมิเนียมสำหรับติดตั้ง 1 ฐาน ราคา	35	บาท
ฑ.	ลูกบิด 4 ตัว ราคา	24	บาท
	รวมเป็นราคาประมาณ	1,045	บาท