

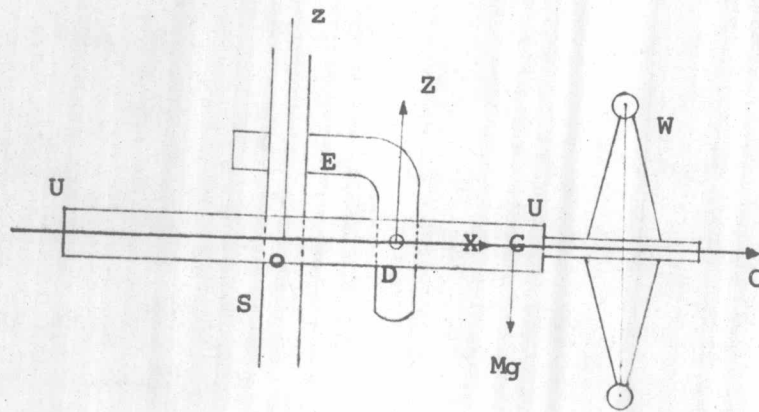
บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ทฤษฎีของใจโรสโคป

เป็นการพิจารณาทฤษฎีและการทำงานของใจโรสโคปแบบสมดุลง่ายที่สามารถปรับค่าโมเมนต์ของแรงคู่ควบได้ ในการทดลองนั้น ถ้าแกนของการหมุนทำมุมคงที่กับแนวตั้งแล้ว จะทำให้ทฤษฎีง่ายขึ้น

2.1.1 ความสัมพันธ์ของแรงคู่ควบและการหมุนควงในกรณีง่ายสุด (relation between couple and precession in simplest case)



รูปที่ 2.1.1 แสดงลักษณะของใจโรสโคปในแนวระดับ

จากรูปที่ 2.1.1 แกนของตัวหมุนที่ตรงติดอยู่กับกรอบ (frame) uu สามารถหมุนรอบแกนแนวระดับที่ D ได้ โดยแกน D นี้จะยึดด้วย E และ E ยึดติดกับแกนตั้งฉาก S. OD คือระยะที่สั้นที่สุดจากแกนของการหมุนควงไปยังจุดหมุน D. แกนของตัวหมุน (W) ติดกับแกนของ D เป็นมุมฉาก และติดกับแกน Oz ของ S ที่จุด O ดังนั้นระนาบที่ประกอบด้วยแกนของ D

และ W จะเป็นระนาบสมมาตร (plane of symmetry) ของกรอบ และระนาบที่ประกอบด้วยแกนที่ตั้งฉากกับแกน D กับแกนของ W ก็จะเป็นระนาบสมมาตรเช่นกัน จุด G เป็นจุดศูนย์กลางของตัวหมุนและกรอบ ซึ่งอยู่บนแนวเส้นตรง OC แนวเดียวกับแกนของ W

ในกรณีง่ายที่สุดนั้น แกน OC ของตัวหมุนจะอยู่ในแนวนอน และเคลื่อนที่เสมือนกับว่ามันตรึงติดกับแกน E

$$\text{มวลของกรอบและตัวหมุน} = M \quad \text{กรัม}$$

โมเมนต์ของความเฉื่อย (moment of inertia) ของตัวหมุนรอบแกน $OC = C$ กรัม-ซม.² ให้ E หมุนด้วยความเร็วเชิงมุม Ω เรเดียนต่อวินาที รอบแกน Oz เมื่อ Ω เป็น + นั้น ความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของ E และแกน OC กับ Oz จะเป็นไปตามกฎมือขวา ในระนาบตามแนวนอน (horizontal plane) ซึ่งมี OC เคลื่อนที่ไปนั้น กำหนดเส้นตรง OB เคลื่อนที่ที่ตั้งฉากกับ OC ตลอดเวลาดังรูป 2.1.2 เมื่อตัวหมุนหมุนรอบแกนด้วยอัตราการหมุน p รอบต่อวินาที สัมพัทธ์กับกรอบ un ดังนั้นความเร็วเชิงมุมสัมพัทธ์กับกรอบคือ $2\pi p$ เรเดียนต่อวินาที

$$2\pi p = \eta \quad (2.1)$$

จากเงื่อนไขที่ให้ E และ un หมุนไปด้วยกัน นั่นคือไม่มีความเร็วเชิงมุมของ un เทียบกับ E แต่ E มีความเร็วเชิงมุมรอบแกน Oz

จะเห็นได้ว่า ความเร็วเชิงมุมของตัวหมุนประกอบด้วย

1. ความเร็วเชิงมุมของ E สัมพัทธ์กับจุดคงที่
2. ความเร็วเชิงมุมของ un เทียบกับ E (ในที่นี้เป็น 0)
3. ความเร็วเชิงมุมของตัวหมุนเทียบกับ un

ในกรณีนี้ OC ตั้งฉากกับ Oz และ E ไม่มีความเร็วเชิงมุมรอบ OC

ดังนั้นถ้า ω เป็นความเร็วเชิงมุมของตัวหมุนรอบ OC จะได้

$$\omega = \eta \quad (2.2)$$

เมื่อพิจารณาโมเมนต์ของตัวหมุนประกอบด้วย 2 ส่วน

1. โมเมนต์ที่เกิดขึ้น เมื่อตัวหมุนหยุดนิ่งสัมผัสกับ xx
2. โมเมนต์ที่เกิดขึ้นในกรณีที่ xx หยุดนิ่งแต่ตัวหมุนหมุนอยู่บนแกนสัมผัสกับ xx

ดังนั้นโมเมนต์เชิงมุมของตัวหมุนรอบแกนใด ๆ จะเป็นผลรวมของโมเมนต์เชิงมุมรอบแกนนั้นอันเนื่องมาจาก

1. ตัวหมุนหยุดนิ่ง แต่เคลื่อนที่ไปกับกรอบ
2. ตัวหมุนหมุนรอบแกน OC ในขณะที่กรอบหยุดนิ่ง

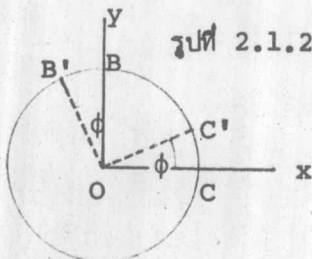
ความเร็วเชิงมุม Ω ของกรอบและตัวหมุนรอบ Oz จะไม่ทำให้โมเมนต์เชิงมุมรอบแกน OC เพิ่มขึ้น ด้วยเหตุที่ว่า

1. มวลของกรอบและตัวหมุนกระจายรอบ OC ในลักษณะสมมาตร
2. $\cos \theta = \frac{\pi}{2}$

ดังนั้นโมเมนต์เชิงมุมรอบ OC คือ $C\eta$

ทำนองเดียวกันไม่ว่าจะเป็นความเร็วเชิงมุม Ω ของกรอบและตัวหมุน หรือความเร็วเชิงมุม η ของตัวหมุน จะไม่ทำให้โมเมนต์เชิงมุมรอบ OB เพิ่มขึ้นเพราะ

1. มวลกระจายอย่างสมมาตรเทียบกับระนาบ BOC
2. $\cos \theta$ มีค่าคงที่ $= \frac{\pi}{2}$



รูปที่ 2.1.2 แสดงการเคลื่อนที่ของแกน OC

จากรูปที่ 2.1.2 ถ้ากำหนดให้ที่เวลา t_0 แกนของการเคลื่อนที่ OC, OB ทับกับแกนหยุดนิ่ง Ox, Oyพอดี เมื่อเวลาผ่านไป t แกนจะเคลื่อนที่ไปถึง OC' เป็นมุม ϕ

รอบ Oz และ OB ไปยัง OB' โมเมนต์เชิงมุมรอบ Ox คือ $C\eta \cos \phi$ และไม่มี
โมเมนต์เชิงมุมรอบ OB'

ถ้าให้อัตราการเพิ่มของโมเมนต์เชิงมุมรอบ Ox = S_ϕ เมื่อ $C'OC = \phi$
และจาก $\frac{d\phi}{dt} = \Omega$ จะได้

$$S_\phi = \frac{d}{dt}(C\eta \cos \phi) = C(-\eta\Omega \sin \phi + \cos \phi \frac{d\eta}{dt}) \quad (2.3)$$

ถ้าให้อัตราการเพิ่มของโมเมนต์เชิงมุมรอบ Ox เมื่อแกนของการหมุนอยู่ที่ Ox, $\phi = 0$
กำหนดให้เป็น S ดังนั้น

$$S = \frac{C\dot{\eta}}{dt}$$

เมื่อไม่มีความเสียดทาน $S = 0$ ดังนั้น η คงที่

ต่อมาเมื่อเวลา t โมเมนต์เชิงมุมรอบแกน Y = $C\eta \sin \phi$

ถ้ากำหนดให้ R_ϕ เป็นอัตราการเพิ่มของโมเมนต์เชิงมุมรอบ Oy เมื่อ $COC' = \phi$ จะได้

$$R_\phi = \frac{d}{dt}(C\eta \sin \phi) = C(\eta\Omega \cos \phi + \sin \phi \frac{d\eta}{dt}) \quad (2.4)$$

ถ้าให้อัตราการเพิ่มของโมเมนต์เชิงมุมรอบ Oy เมื่อแกนของการหมุนอยู่ในทิศ Ox โดย
 $\phi = 0$ กำหนดให้เป็น R

$$\text{จะได้ } R = C\eta\Omega \quad \text{เมื่อ } \frac{d\phi}{dt} = \Omega \quad (2.5)$$

เมื่อพิจารณาแรงกระทำของโลกต่อกรอบและตัวหมุน มีค่า = Mg ไตน์ กระทำที่จุด G
ดังนั้นที่จุด D (จุดที่แกน OC ตัดกับแกนของการหมุน D) จะมีแรงกระทำ 3 แรงคือ
X, Y, Z และแรงคู่ควบ $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$ ในทิศทาง $\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z}$ ถ้าแกน D ไม่มี
ความเสียดทาน $\Gamma_2 = 0$. และเนื่องจากการเคลื่อนที่สม่ำเสมอ โดยคิดว่าไม่มีความต้านทาน

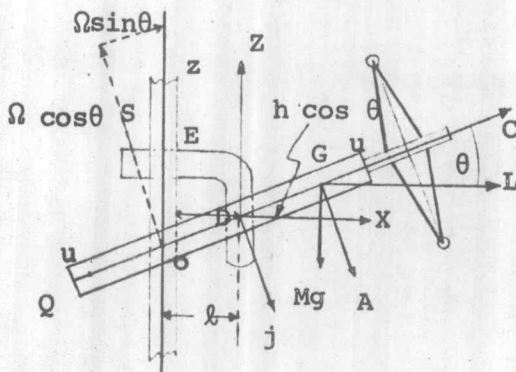
ของอากาศ แรง Y และแรงคู่ควบ Γ_3 ตัดทิ้งได้ จากการที่กรอบและตัวหมุนสมมาตรรอบแกน Ox ทำให้ $1 = 0$

ดังนั้นจะมีแรง 2 แรงเท่ากันคือ $Z = Mg$ และอยู่ห่างกัน $= h$ ทำให้เกิด โมเมนต์ของแรงคู่ควบ $= Mgh$ เมื่อ h คือระยะทางจาก G ถึง D แรงคู่ควบ Mg จะทำให้ อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์เชิงมุมรอบแกน Oy มีค่า Mgh เมื่อ $\phi = 0$ ดังนั้น

$$c\eta\Omega = R = Mgh \quad (2.6)$$

สมการที่ (2.6) จะใช้ในกรณีที่มีการเคลื่อนที่เป็นไปอย่างสม่ำเสมอและแกนของการหมุนอยู่ในแนวระดับ

2.1.2 การเคลื่อนที่ในกรณีที่แกนของใจโรสโคปเอียงเป็นมุมคงที่ (general case of motion with constant slope of axle)



รูปที่ 2.1.3 แสดงถึงแกนใจโรสโคปเอียง ทำมุมกับแนวระดับ

ในกรณีที่หัวไปแกน GC ไม่อยู่ในแนวระดับ แต่ทำมุม $CGL = \theta$ กับ GL ซึ่งอยู่ในแนวระดับและอยู่ในระนาบ COZ กำหนดแกนสำหรับตัวหมุนและกรอบดังนี้ แกน GC และ GA อยู่ในระนาบ COZ ส่วนแกน GB ตั้งฉากกับระนาบ CGA ซึ่งเข้าไปในกระดาษ แกนทั้งสามนี้ถือเป็นแกนหลัก (principal axis) ที่จุด G ของใจโรสโคป.

ถ้าให้ โมเมนต์ของความเฉื่อยของตัวหมุนและของกรอบ

รอบ GC เป็น C และ C'

รอบ GA เป็น A และ A'

ความเร็วเชิงมุม Ω ของ E และ บน รอบ Oz แบ่งเป็น $\Omega \sin \theta$ รอบ GC และ $-\Omega \cos \theta$ รอบ GA

เมื่อตัวหมุนหมุน p รอบต่อวินาที มีความเร็วเชิงมุม $2\pi p = \eta$ ดังนั้นถ้าผล
ของความเร็วเชิงมุม (resultant angular velocity) ของตัวหมุนรอบ GC = ω

$$\text{จะได้ } \omega = 2\pi p + \Omega \sin \theta \quad (2.7)$$

$$\text{หรือ } \omega = \eta + \Omega \sin \theta \quad (2.8)$$

$$\text{โดยมีความเร็วเชิงมุมของตัวหมุนรอบ GA} = -\Omega \cos \theta$$

เพราะฉะนั้นโมเมนต์เชิงมุมรอบ GC ของกรอบคือ $C' \Omega \sin \theta$ และของตัวหมุน
คือ $C (\eta + \Omega \sin \theta)$ โมเมนต์เชิงมุมรอบ GA คือ $-(A + A') \Omega \cos \theta$
ถ้าให้ F เป็นโมเมนต์เชิงมุมของตัวหมุนและของกรอบรอบ GL ในระนาบ COZ

$$\text{จะได้ } F = (C' \Omega \sin \theta + C\eta + C\Omega \sin \theta) \cos \theta - (A + A') \Omega \cos \theta \sin \theta$$

$$F = C\eta \cos \theta + (C + C' - A - A') \Omega \cos \theta \sin \theta \quad (2.9)$$

จากวิธีการในหัวข้อ 2.1.2 อัตราการเพิ่มของโมเมนต์เชิงมุมรอบแกน GB คือ R

$$R = F\Omega \quad (2.10)$$

โมเมนต์ของแรง X ซึ่ง $X = -M (\ell + h \cos \theta) \Omega^2$ และโมเมนต์ของแรง Z
ซึ่ง $Z = Mg$ รอบ GB คือ R

$$F\Omega = R = -Xh \sin \theta + Zh \cos \theta$$

$$= M (\ell + h \cos \theta) \Omega^2 h \sin \theta + Mgh \cos \theta$$

$$= Mgh \cos \theta + M (\ell + h \cos \theta) \Omega^2 h \sin \theta \quad (2.11)$$

แทนสมการ (2.9) ลงใน (2.11) แล้วหารด้วย $\cos \theta$

$$Mgh = C\eta\Omega + (C + C' - A - A' - Mh^2) \Omega^2 \sin \theta - Ml \Omega^2 h \tan \theta.$$

ถ้าให้โมเมนต์ของความเฉื่อยของตัวหมุนและกรอบรอบ DC และ DJ เป็น K และ H

$$C + C' = K ; A + A' + Mh^2 = H$$

$$Mgh = C\eta\Omega + Q\Omega^2 \quad (2.12)$$

$$Q = (K - H) \sin \theta - Mlh \tan \theta$$

และถ้า $Q = 0$ ก็จะได้เหมือนสมการ (2.6) คือ

$$Mgh = C\eta\Omega \quad (2.12a)$$

ซึ่งสามารถทำได้โดยให้ $\theta = 0$ หรือทำให้ $Q = 0$ โดย θ มีค่าใด ๆ ก็ได้
ถ้าสร้างเครื่องมือให้ $K = H$ และ $l = 0$

ในกรณีนี้ $Q \neq 0$ ค่า Ω จะมีได้ 2 ค่า

$$\Omega = \frac{C\eta}{2Q} \left[-1 \pm \sqrt{1 + \frac{4QMgh}{C^2\eta^2}} \right] \quad (2.13)$$

เมื่อ $|4QMgh| < C^2\eta^2$ ไม่ว่า Qh จะเป็น + หรือ - แล้ว , ค่า
ทั้งสองค่าจะเป็นจริง ในการทดลอง Q และ θ น้อยมาก เมื่อกระจายค่าในรากกำลังที่
สองออกไป , แล้วตัดเทอมกำลังสองทิ้งจะได้

$$\left[1 + \frac{4QMgh}{(C\eta)^2} \right]^{\frac{1}{2}} = 1 + \frac{2QMgh}{(C\eta)^2}$$

$$\Omega = \frac{C\eta}{2Q} \left[-1 \pm \left(1 + \frac{2QMgh}{C^2\eta^2} \right) \right] \quad (2.14)$$

$$\text{จะได้ค่า } \Omega_1 = \frac{Mgh}{c\eta} \quad , \quad \Omega_2 = -\frac{c\eta}{Q} \left(1 + \frac{QMgh}{c^2\eta^2}\right)$$

เนื่องจาก Q มีค่าน้อย ดังนั้น Ω_2 เขียนได้ว่า $= -\frac{c\eta}{Q}$ ถ้า $\Omega = -\frac{c\eta}{Q}$
แสดงว่าถ้ามุมยังน้อย $|\Omega|$ จะมีค่าสูงมาก แต่ในทางทดลองนั้นเป็นไปได้ ดังนั้นค่า
ที่ปรากฏในการทดลองจะเป็นค่าใกล้เคียงกับ $\frac{Mgh}{c\eta}$

เมื่อพิจารณาสมการ (2.12) ค่า $\frac{\Omega}{\eta}$ น้อย , θ น้อย

$$\theta = \sin \theta = \tan \theta$$

$$Q = (K - H) \theta - Mh\ell\theta$$

$$= (K - H - Mh\ell) \theta$$

$$Mgh = c\eta\Omega + (K-H-Mh\ell)\theta\Omega^2$$

$$Mgh = c\eta\Omega \left(1 + \frac{f\theta}{n}\right) ; \quad (2.15)$$

$$\text{เมื่อ } f = \frac{K - H - Mh\ell}{c} ; \quad \frac{1}{n} = \frac{\Omega}{\eta}$$

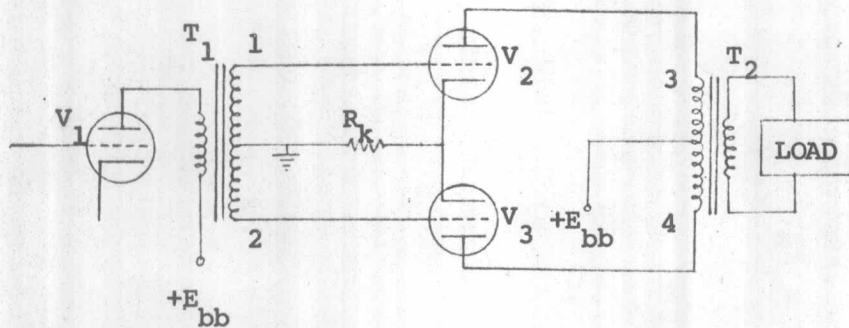
สมการที่ (2.15) จะใช้ในการคำนวณเพื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองต่อไป

2.2 การส่งกำลังโดยไม่ใช่สาย

การส่งกำลังในที่นี้หมายถึงการเหนี่ยวนำจากขดลวดที่มีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก
แล้วทำให้เกิดกระแสขึ้นเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงนั้นในขดลวดรับกำลัง ซึ่งเป็นไปตามกฎของ
ฟาราเดย์ (Faraday's law) และทิศทางของกระแสเหนี่ยวนำก็เป็นไปตามกฎของเลนซ์
(Lenz's law) ดังนั้นการส่งกำลังแบบนี้จึงเป็นการส่งกำลังแบบเหนี่ยวนำ (induction)
ไม่ใช่การส่งกำลังแบบการแผ่รังสี (radiation)

2.2.1 หลักการทำงานของเครื่องขยายแบบพุช-พูล (push-pull amplifier)

เพื่อที่จะให้การทำงานของหลอดในการขยายสัญญาณ มีประสิทธิภาพดีสามารถให้กำลังออกมา มากกว่าที่หลอดเดียวจะทำได้นั้น ก็ใช้หลอด 2 หลอดช่วยกันทำงาน (two-valve transmitter) ซึ่งเรียกว่าเครื่องขยายแบบพุช-พูล มีวงจรพื้นฐานดังแสดงในรูป



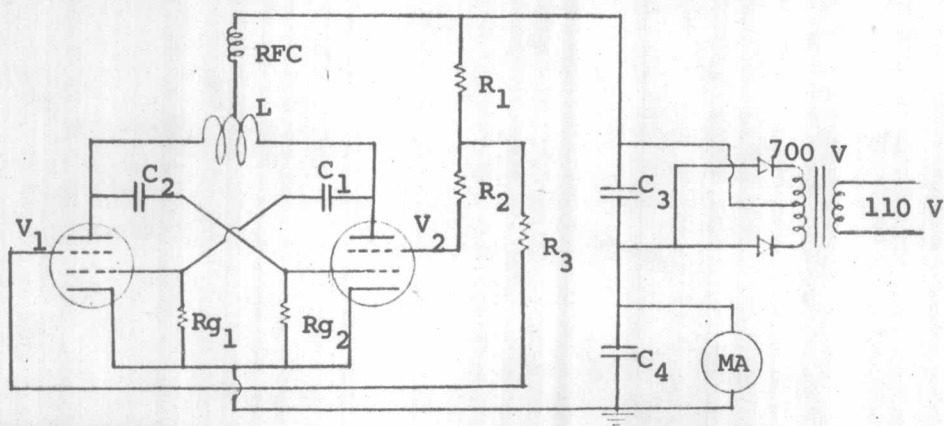
รูปที่ 2.2.1 วงจรแสดงการทำงานของเครื่องขยายแบบพุช-พูล

T_1 เป็นหม้อแปลงส่วนป้อน (input transformer) ที่รับสัญญาณจากหลอด V_1 โดยขดลวดทุติยภูมิของ T_1 จะมีสายกลาง (center tap) แต่ละปลายของขดลวดต่อกับกริดของ V_2 และ V_3 . จะเห็นว่าศักดาป้อน (input voltage) ที่ 1 และ 2 จะมีเฟสตรงข้ามป้อนเข้ากริดของ V_2 และ V_3 ตัวความต้านทาน R_k เป็นตัวล่ำเอียงกริด (grid bias) ของหลอดทั้งสอง ขดปฐมภูมิของหม้อแปลงส่วนคาย (out put transformer) T_2 ก็จะต่อสายกลางลงกราวด์และปลายทั้งสองของขดลวดต่อเข้ากับเพลท V_2, V_3 . เมื่อจุดที่ 1 ของขดลวดทุติยภูมิเป็นบวก จุด 2 จะเป็นลบ ศักดาป้อนบวกที่กริดของ V_2 จะลดล่ำเอียงลบ (negative bias) ทำให้กระแสเพลทเพิ่มมากขึ้นและเมื่อกระแสไหลผ่านส่วนบนของขดลวดปฐมภูมิของ T_2 ไปยัง $+E_{bb}$ นั้น จะทำให้เกิดศักดาคร่อมขดลวดทุติยภูมิของ T_2 . ในเวลาเดียวกัน ศักดาลบก็จะทำให้กริดของ V_3 เป็นลบมากขึ้น ผลคือกระแสเพลทของ V_3 จะลดลง ทำให้กระแสที่ไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิครึ่งล่างของ T_2 ลดลงด้วย การลดลงของกระแสทำให้เกิดศักดา

คร่อมขดลวดทุติยภูมิของ T_2 ขึ้น สักดาเนื่องจากการเพิ่มของกระแสที่หลอด V_2 และสักดาเนื่องจากการลดของกระแสของหลอด V_3 ที่ขดลวดทุติยภูมิ T_2 จะอยู่ในทิศเดียวกัน ดังนั้นกำลังจากส่วนคายจะเป็นสองเท่าของที่ได้จากหลอดหลอดเดียว.

2.2.2 วงจรและการทำงานของเครื่องส่งกำลัง (transmitter)

โดยใช้การทำงานของหลอดเตโตรด (tetrode) 2 หลอดสลับกันสร้างสัญญาณผ่านขดลวดเช่นเดียวกับหัวข้อ 2.2.1 แสดงด้วยวงจรในรูปที่ 2.2.2 เมื่อเริ่มต้นทำงานหลอดทั้งสองเริ่มนำกระแสแต่จะมีหลอดหนึ่งที่น่ากระแสก่อน เพราะวงจรรและหลอดทั้งสองไม่สามารถที่จะมีคุณสมบัติเหมือนกันทุกอย่างได้ เมื่อกระแสไหลผ่าน V_1 จะทำให้เกิดสักดาคร่อมขดลวด L ที่ต่อสายกลางผ่าน RFC ดังนั้นสักดาที่เพลทของ V_1 จะลดลง C_2 จะเริ่มคายประจุ ทำให้กริดที่ V_2 มีสักดาเป็นลบ, กระแสใน V_2 ก็จะลดลง การลดของกระแสใน V_2 ทำให้สักดาคร่อม L ลดลงด้วย สักดาที่เพลทของ V_2 จึงเพิ่มขึ้น C_1 ก็จะเริ่มประจุ เมื่อ C_1 ประจุนั้นทำให้กริดของ V_1 มีสักดาเป็นบวกเพิ่มขึ้น ทำให้หลอด V_1 นำกระแสได้มากขึ้น V_1 จะนำกระแสอยู่ในช่วงเวลาหนึ่งที่ยื่นกับค่า C_2 และ R_{g2} เมื่อเวลาช่วงนี้ผ่านไปสักดาลบที่กริด V_2 จะลดลง หลอด V_2 ก็สามารถจะนำกระแสได้ เมื่อ V_2 นำกระแสก็จะทำให้เกิดสักดาคร่อม L มากขึ้น สักดาที่เพลท V_2 จะลดลง C_1 ก็จะทำการคายประจุไปเรื่อย ๆ ทำให้กริดของ V_1 มีสักดาเป็นลบมากขึ้น กระแสในหลอด V_1 จะลดลง เมื่อกระแสลดลงสักดาที่เพลทของ V_1 ก็

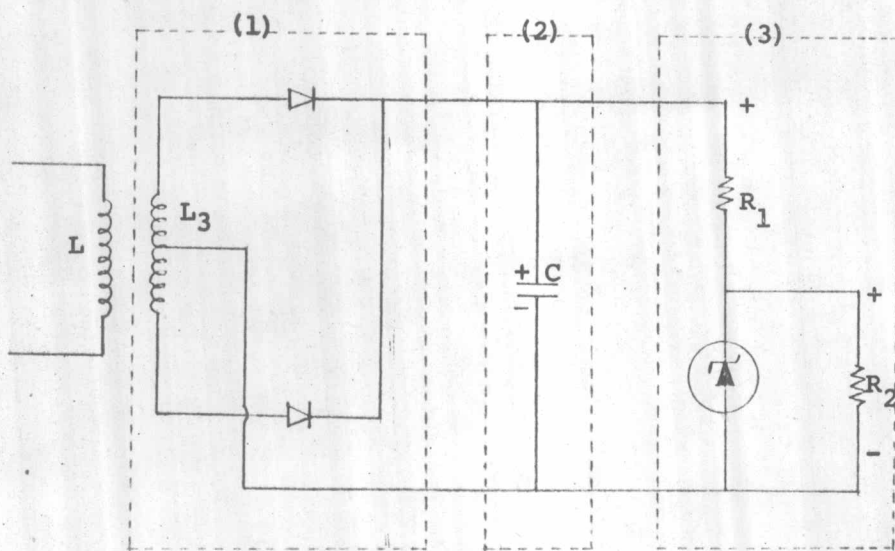


รูปที่ 2.2.2 วงจรแสดงการทำงานของเครื่องส่ง (transmitter)

เพิ่มสูงขึ้น. C_2 จะประจุทำให้กริดของ V_2 มีศักยาลบลดลง หลอด V_2 จะนำกระแสสูงขึ้น
 ที่ในขณะหลอด V_1 ตัดขาด (cut-off). จะเห็นได้ว่าการทำงานของหลอดเป็นแบบสลับ
 กัน เมื่อหลอดหนึ่งทำงานอีกหลอดจะหยุดทำงานสลับกันไปตลอด จากหลักการของพูช-พูล จะเห็น
 ได้ว่าขดลวด L ทำหน้าที่เหมือนกับขดลวดปฐมภูมิของ T_2 ในหัวข้อ 2.2.1

2.2.3 วงจรและการทำงานของเครื่องรับกำลัง (receiver)

จากการที่เครื่องส่งส่งสัญญาณแรงดันสลับ แต่ตัวมอเตอร์ที่จะใช้นั้นเป็นมอเตอร์กระแสตรง
 ดังนั้นจึงต้องมีการเปลี่ยนจากกระแสสลับให้เป็นกระแสตรงโดยการใช้วงจรเรกติไฟเออร์แบบเต็มคลื่น
 (full-wave rectifier) และกรองแรงดันด้วยตัวเก็บประจุ (capacitor filter) และ
 ตัวทำศักยาลให้สม่ำเสมอ (voltage regulator) ด้วยซีเนอร์ไดโอด (zener diode) ดัง
 แสดงในรูปที่ 2.2.3 จากรูปจะเห็นว่าส่วนที่ 1 ทำหน้าที่เรกติไฟเออร์โดยมีขดลวด L_3 เป็น
 ขดลวดรับกำลัง จากขดลวดส่งกำลัง L ส่วนนี้ใช้ไดโอดเพื่อนำกระแสในเฉพาะทิศทาง ส่วนที่ 2



รูปที่ 2.2.3 แสดงวงจรของเครื่องรับกำลัง (receiver)

ประกอบด้วยตัวเก็บประจุซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวกรองไฟ (capacitor filter) เพื่อให้แรงดันคงที่ตลอดเวลา ส่วนที่ 3 เป็นส่วนของตัวทำศักดาให้สม่ำเสมอ (voltage regulator section) โดยการต่อซีเนอร์ไดโอดแบบผกกลับ (reverse direction) ซึ่งทำให้กระแสไม่สามารถไหลผ่านตัวมันได้ทราบเท่าที่แรงดันคร่อมซีเนอร์ไดโอดนั้นยังไม่เกินแรงดันซีเนอร์ (zener voltage) นั่นคือมันสามารถรักษาระดับของศักดาผกกลับ (reverse voltage) ให้มีค่าเท่ากับค่าของแรงดันซีเนอร์ตลอดเวลา ทำให้แรงดันคร่อมมอเตอร์ R_2 คงที่.

000631