บทที่ 2

ทฤษฎี

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. อันตรกริยาของรังสีแกมมากับสสาร

สารกัมมันตรังสีที่ปล่อยรังสีแกมมา เมื่อไปปะทะกับสสารจะเกิดอันตรกริยาแบบต่าง ๆ ซึ่งแล้วแต่ขนาดของพลังงานรังสีแกมมา และชนิดของสสารอันตรกริยาแบ่งได้เป็น 3 พวกใหญ่[1] คือ

1.1 ปฏิกิริยาแบบโฟโตอิเลคตริก (photoelectric effect) เป็นขบวนการที่โฟตอนเกิดอันตรกริยากับอะตอมของวัตถุนั้น ๆ โดยถ่ายเทพลังงานให้แก่อิเลคตรอนในเชล (shell)ใดเชลหนึ่งจนหมด แล้วอิเลคตรอนตัวนั้นก็จะหลุดออกจากวงจร โดยมีพลังงานจลน์เท่ากับพลังงานของรังสีแกมมานั้นลบด้วยพลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy) ของเชลที่อิเลคตรอนตัวนั้นอยู่ และเมื่ออิเลคตรอนในเชลหนึ่งหลุดออกไป อิเลคตรอนที่อยู่ในเชลถัดไปก็จะเคลื่อนเข้าแทนที่ต่อ ๆ กัน

1.2 ปฏิกิริยาแบบคอมพ์ตัน (Compton scattering) ขบวนการนี้เหมือนกับการชนของลูกบิลเลียด คือ โฟตอนเกิดอันตรกริยากับอิเลคตรอนอิสระที่อยู่ในวัตถุนั้น โดยเกิดการชน แล้วถ่ายเทพลังงานให้อิเลคตรอนไม่หมด นั่นคือ พลังงานส่วนหนึ่งจะถูกถ่ายเทให้อิเลคตรอนตัวที่ถูกชนนั้นกระเด็นออกไป และพลังงานส่วนที่เหลือก็จะเป็นโฟตอนที่มีความยาวคลื่นยาวกว่าเดิม พร้อมทั้งทิศทางก็เปลี่ยนไปจากเดิม

1.3 ปฏิกิริยาแบบอิเลคตรอนคู่ (pair production) ขบวนการนี้เกิดขึ้นในบริเวณสนามคูลอมบ์ (Coulomb field) ของนิวเคลียส เมื่อรังสีแกมมาผ่านเข้าใกล้นิวเคลียสใดจะเกิดปรากฏการณ์อย่างหนึ่ง คือ รังสีแกมมานั้นหายไปแล้วเกิดอิเลคตรอนและโพซิตรอนขึ้นมาแทนคู่หนึ่ง โดยพลังงานของรังสีแกมมานั้นกลายเป็นพลังงานจลน์ของอิเลคตรอนและโพซิตรอนบวกกับมวลขณะหยุดนิ่ง (rest energy) ของอนุภาคทั้งสองนี้ สำหรับโพซิตรอนที่เกิดขึ้นเมื่อวิ่งไปก็จะสูญเสียพลังงานทำให้ตัวเองวิ่งช้าลง ๆ จนในที่สุดเมื่อพบกับอิเลคตรอนก็จะรวมกันหายตัวไปทั้งคู่

กลายเป็นโฟตอนล่องตัววิ่งออกจากกันในทิศทางตรงข้าม โดยแต่ละตัวมีพลังงานเท่ากันคือ 0.51 ล้านอิเลคตรอนโวลต์ และเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นแบบนี้เรียกว่า เกิดการประลัย (annihilation) ด้วยเหตุนี้จึงเห็นได้ว่าปฏิกิริยาแบบอิเลคตรอนคู่ จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อรังสีแกมมามีพลังงานมากกว่า 1.02 ล้านอิเลคตรอนโวลต์

2. อันตรกริยาของรังสีแกมมาที่มีต่อโซเดียมไอโอไดด์(ทาลเลียม)

ปรากฏว่าที่พลังงานต่ำ ๆ จะเกิดปฏิกิริยาแบบโฟโตอิเลคตริก เป็นส่วนใหญ่ และที่พลังงานสูงขึ้นมาจะเกิดปฏิกิริยาแบบคอมพ์ตัน ถ้าพลังงานรังสีแกมมาสูงเกินกว่า 1.02 ล้านอิเลคตรอนโวลต์ เกิดปฏิกิริยาแบบอิเลคตรอนคู่ จากปฏิกิริยาต่างๆ เหล่านี้ ทำให้เกิดอิเลคตรอนขึ้นทั้งนั้น อิเลคตรอนที่เกิดขึ้นจะไปกระตุ้น (excite) อะตอมของโซเดียมไอโอไดด์(ทาลเลียม) ตามทางที่ผ่านไป อะตอมต่าง ๆ เหล่านี้ จะคายพลังงานออกมาในรูปของโฟตอน เพื่อ มาอยู่ในสถานะปกติ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ขบวนการ การเกิดสถานะโลด (excitation process) หรืออิเลคตรอนที่เกิดขึ้นนี้อาจจะไปทำให้อะตอมของโซเดียมไอโอไดด์ (ทาลเลียม) เกิดแตกตัวเป็นประจุไฟฟ้า (ionize) โดยทำให้อิเลคตรอนที่วนอยู่รอบ ๆ นิวเคลียส์ของโซเดียมไอโดไดด์ (ทาลเลียม) หลุดออกไปทำให้เกิดที่ว่างขึ้น อิเลคตรอนตัวใหม่จะถูกจับเข้ามาแทนที่ เกิดการส่งผ่านประจุ (charge transfer)ทำให้เกิดการลดพลังงานศักย์ (potential energy) พลังงานจะถูกปลดปล่อยออกมาในรูปโฟตอนเช่นกัน เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าขบวนการ การเกิดไอออน (ionization process) พลังงานในรูปของโฟตอนจาก 2 ปรากฏการณ์นี้จะถูกส่งผ่านไปยังทาลเลียม ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวให้เกิดแส่ง จะทำให้อะตอมของทาลเลียมได้รับการกระตุ้น แล้วคายพลังงานออกมาในรูปของแส่งสีน้ำเงินที่มองเห็นได้ (visible blue photons) ซึ่งแส่งเหล่านี้จะไปกระทบแผ่นโฟโตคะโทด (photocathode) ซึ่งอยู่ระหว่างผลึกโซเดียมไอโอไดด์ (ทาลเลียม) กับ หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (photomultiplier tube) โฟโตคะโทดทำด้วยโลหะผสมระหว่างแคดเมียม กับ แอนติโมนี มีเวิคฟังชั่น (work function)ต่ำ เมื่อแส่งไปตกกระทบ จะให้อิเลคตรอนออกมาเป็นปริมาณโดยตรงกับความเข้มของแส่ง อิเลคตรอนเหล่านี้จะถูกขยายภายในหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ โดยการเคลื่อนที่จากไดโนด (dynode)หนึ่งไปยังอีกไดโนดหนึ่ง ซึ่งมีความต่างศักย์สูงกว่าอันแรก ความต่างศักย์ที่ใช้กับหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ ได้มาจากไฟฟ้าศักย์สูง (high voltage supply) ผลที่สุด

อิเลคตรอนทั้งหมด จะเคลื่อนที่ไปที่ อะโนด (anode) ซึ่งเป็นขั้วสะสม จะได้สัญญาณซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานที่ดูดกลืนภายในผลึกโซเดียมไอโอไดด์ ออกมาทางเอาท์พุท (output) แล้วเข้าวงจรขยายต่อไป

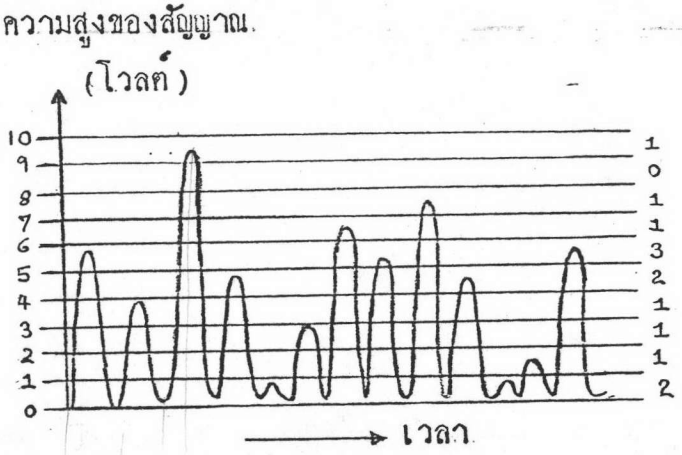
วงจรขยายสัญญาณมี 2 ระบบ คือ พรีแอมปลิไฟเออร์ (pre-amplifier) กับ เมน แอมปลิไฟเออร์ (main amplifier)

2.1 พรีแอมปลิไฟเออร์ คุณสมบัติของพรีแอมปลิไฟเออร์ คือต้องมีสิ่งรบกวน (noise) ต่ำมากและมีกำลังขยาย (gain) ไม่สูงนักทำหน้าที่เป็น แมทชิ่ง (matching) หรือเป็นบัฟเฟอร์ (buffer) เพื่อปรับคุณค่าทางวงจรไฟฟ้า ของหัววัดรังสีให้เข้ากับ เมน แอมปลิไฟเออร์ปกติแล้ว พรี แอมปลิไฟเออร์จะอยู่ใกล้กับหัววัดรังสี

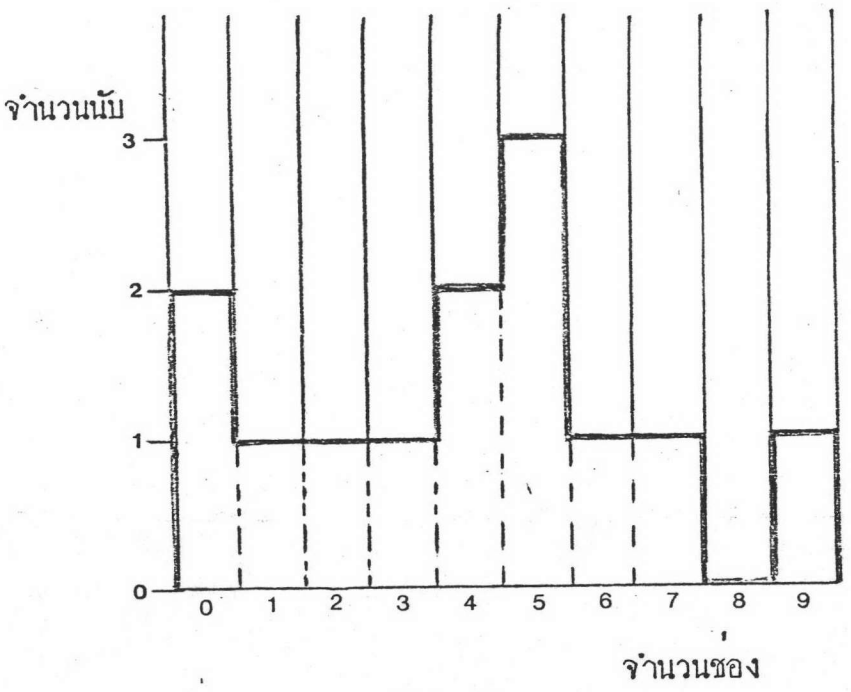
2.2 เมนแอมปลิไฟเออร์ เป็นระบบที่ขยายสัญญาณให้ได้ขนาดพอเหมาะที่จะทำให้นับสัญญาณได้ คุณลักษณะคือ กำลังขยายสูง โดยมีความคงที่แน่นอนของกำลังขยายที่มีต่อขนาดของสัญญาณที่จะทำการขยายอย่างเชิงเส้นสูง พร้อมทั้งปรับปรุงรูปร่าง (shaping) ของสัญญาณให้เหมาะสม

3. การวิเคราะห์สัญญาณของเครื่องวิเคราะห์หลายช่อง

หลักการวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณ[2] เมื่อสัญญาณจากชุดหัววัดรังสีป้อนผ่านวงจรขยายสัญญาณ จะได้สัญญาณที่มีขนาดความสูงเป็นสัดส่วนกับพลังงานของรังสีที่เข้ามาและถูกดูดกลืนโดยหัววัด วิธีการนับจำนวนสัญญาณ โดยการใช้วิธีคัดเลือกความสูงที่อยู่ในช่วงขนาดเดียวกันให้นับรวมกัน เรียกว่า ช่อง (channel) ถ้าแบ่งจำนวนช่องนี้เป็นช่องเล็ก ๆ ก็สามารถวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณได้ละเอียดขึ้นตัวอย่างเช่น สมมุติให้มีสัญญาณพัลส์ที่เข้ามาโดยมีขนาดความสูงของพัลส์ตั้งแต่ 0 ถึง 10 โวลต์ และถ้าแบ่งความสูงของสัญญาณนี้ โดยแบ่งจาก 10 โวลต์ เป็นจำนวนช่อง 10 ช่อง เมื่อจำนวนพัลส์ที่มามีขนาดดังในรูปที่ 2.1 ก. ให้นับจำนวนพัลส์ที่มีความสูงอยู่ในช่องเดียวกันเข้าด้วยกัน เช่นช่องที่ 5 นับพัลส์ที่มีความสูงเท่ากับหรือมากกว่า 5 โวลต์ แต่ต้องน้อยกว่า 6 โวลต์ ซึ่งจะมีจำนวน 3 พัลส์ แล้วนำค่าที่ได้ต่าง ๆ นี้ไปเขียนกราฟ โดยให้แกน แนวนอนแบ่งออกเป็น 10 ช่อง ซึ่งตรงกับจำนวนช่องที่ความสูงของสัญญาณอยู่ ส่วนในแกนแนวตั้งแทนจำนวนนับของจำนวนพัลส์



รูปที่ 2.1 ก. แสดงภาพของสัญญาณก่อนวิเคราะห์



รูปที่ 2.1 ข. แสดงกราฟหลังจากวิเคราะห์สัญญาณแล้ว

ที่มีความสูงอยู่ในช่องเดียวกัน ดังแสดงในรูป 2.1 ข.

ความละเอียดของการวิเคราะห์สเปคตรัมขึ้นอยู่กับการแบ่งจำนวนช่อง เช่น ที่ขนาดความสูงของสัญญาณจาก 0 ถึง 10 โวลต์ อาจแบ่งเป็น 2^9 = 512 ช่อง หรือ 2^{10} = 1024 ช่อง การแบ่งช่องมากขึ้นจะได้รายละเอียดมากขึ้น แต่ทั้งนี้ยังขึ้นอยู่กับคุณภาพของหัววัดรังสีที่จะสามารถแยกระดับพลังงานของรังสี (resolution) ด้วย

3.1 <u>ส่วนประกอบของเครื่องวิเคราะห์หลายช่อง</u>[2,3] โดยทั่วไปเครื่องวิเคราะห์หลายช่องจะมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ชุดเปลี่ยนสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล ชุดหน่วยความจำ และ ชุดแสดงผล

3.1.1 <u>ชุดเปลี่ยนสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล</u> การทำงานของชุดเปลี่ยนสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล คือ จะเปลี่ยนขนาดความสูงของสัญญาณอนาลอกที่เข้ามาเป็นรหัสไบนารี ซึ่งเป็นสัญญาณดิจิตอล รหัสไบนารีนี้เป็นรหัสที่ใช้กำหนดแอดเดรสของหน่วยความจำ

วิธีการเปลี่ยนขนาดความสูงของสัญญาณอนาลอกเป็นรหัสไบนารีมีหลายวิธี วิธีที่นิยมใช้กันทั่วไป คือ การให้ตัวเก็บประจุมีอัตราการคายประจุในลักษณะเชิงเส้น วิธีการนี้ เริ่มจากสัญญาณอนาลอกเข้าไปประจุที่ตัวเก็บประจุจนถึงแรงดันสูงสุด ตัวกำเนิดสัญญาณจะผลิตสัญญาณนาฬิกาออยู่ที่วงจรนับ ขณะที่ตัวเก็บประจุเริ่มคายประจุผ่านชุดจ่ายกระแสคงที่ จะมีสัญญาณไปควบคุมให้วงจรนับเริ่มนับ และจะหยุดนับเมื่อการคายประจุเสร็จสิ้นลง รหัสไบนารีที่วงจรนับนับได้นี้จะเป็นสัดส่วนกับความสูงของสัญญาณอนาลอก

3.1.2 <u>ชุดหน่วยความจำ</u> สัญญาณอนาลอกเมื่อถูกวิเคราะห์แล้วข้อมูลจะถูกเก็บในหน่วยความจำ วิธีการเก็บข้อมูลคือ เมื่อสัญญาณอนาลอกถูกเปลี่ยนเป็นรหัสไบนารีแล้ว รหัสไบนารีนี้จะไปที่แอดเดรสของหน่วยความจำ แล้วหน่วยความจำจะอ่านข้อมูลในตำแหน่งแอดเดรสนี้ออกมาให้แก่หน่วยนับ หน่วยนับจะบวกจำนวนนับเข้าไปอีกหนึ่ง แล้วป้อนให้หน่วยความจำเข้าไปเก็บยังตำแหน่งเดิม จะเห็นว่าหน่วยความจำจะเก็บข้อมูลเป็นจำนวนครั้งที่สัญญาณเข้ามา โดยที่แอดเดรสของหน่วยความจำจะเป็นสัดส่วนกับความสูงของสัญญาณอนาลอก

3.2 <u>วิธีวิเคราะห์สัญญาณของเครื่องวิเคราะห์หลายช่อง</u>[3] เมื่อมีสัญญาณอนาลอกเข้ามายังชุดเปลี่ยนสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล จะถูกเปลี่ยนเป็นข้อมูลรหัสไบนารี โดยข้อมูล

รหัสไบนารีนี้จะเป็นสัดส่วนกับขนาดความสูงของพัลส์ สำหรับข้อมูลรหัสไบนารี ใช้เป็นแอดเดรสของหน่วยความจำ ในที่สุด ข้อมูลในชุดหน่วยความจำ จะถูกบวกเพิ่มอีกหนึ่งเข้าไป ตัวอย่างเช่น สมมุติให้สัญญาณอนาลอกมีขนาดแรงดัน 2.5 โวลต์ เมื่อถูกชุดเปลี่ยนสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล เปลี่ยนเป็นจำนวนช่องที่ 137 ถ้าให้ข้อมูลของหน่วยความจำที่แอดเดรส 137 มีค่า 514 เมื่อมีการบวกหนึ่งจะได้ 515 แล้วป้อนกลับไปเก็บที่เดิม

สถาบันวิทยบริการ

4. <u>ตัวเก็บประจุ</u>

ในวงจรใด ๆ ที่มีแต่ตัวต้านทาน กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรนั้นจะมีค่าคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา แต่ถ้าในวงจรมีทั้งตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรในขณะใด ๆ จะมีค่าไม่คงที่ โดยจะขึ้นอยู่กับเวลา ตามรูปที่ 2.2 แสดงถึงวงจรที่ประกอบด้วยตัวต้านทาน R และตัวเก็บประจุ C

เมื่อสับสวิตช์มาที่จุด a กระแสไฟฟ้าจะไหลในวงจร สมมุติว่าในเวลา dt จำนวนประจุที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดใด ๆ ในวงจรเท่ากับ dq ดังนั้น งานที่แรงเคลื่อนไฟฟ้ากระทำได้คือ Edq ซึ่งจะมีค่าเท่ากับงานที่เกิดขึ้นแก่ตัวต้านทาน R และ ตัวเก็บประจุ C ในเวลา dt พลังงานที่เกิดขึ้นกับตัวต้านทาน R ในรูปของความร้อนคือ i^2Rdt และพลังงานที่เก็บไว้ในตัวเก็บประจุในรูปของสนามไฟฟ้าคือ

$$dU = d\left(\frac{q^2}{2C}\right) \qquad (2.1)$$

จากหลักพลังงานคงตัว จะได้

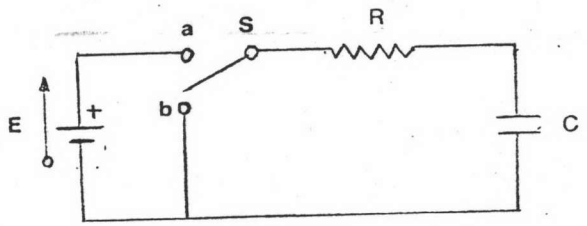
$$E\,dq = i^2R\,dt + d\left(\frac{q^2}{2C}\right) \qquad (2.2)$$

จะได้

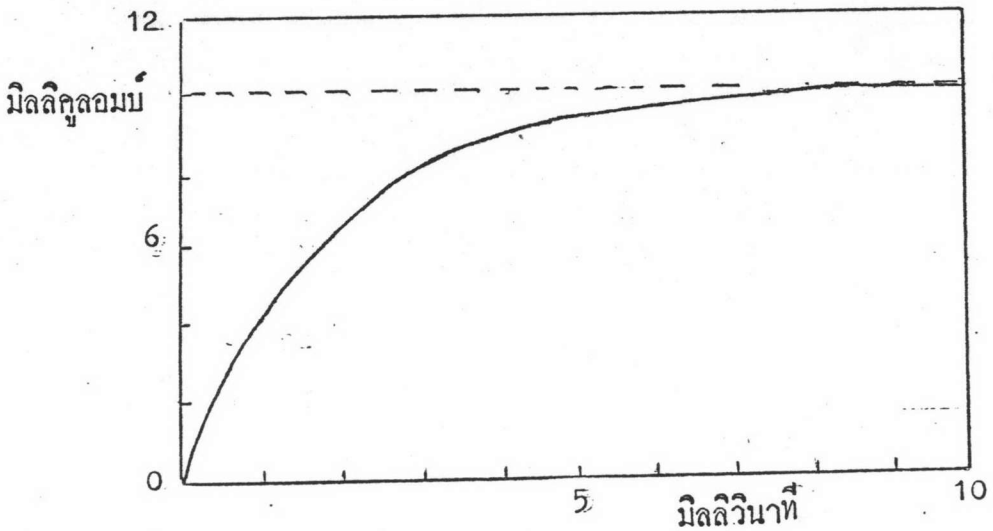
$$E - iR - \frac{q}{C} = 0 \qquad (2.3)$$

จากสมการ (2.3) จะคำนวณหาจำนวนประจุ q ที่เก็บสะสมไว้ในตัวเก็บประจุในเวลา ใด ๆ คือ

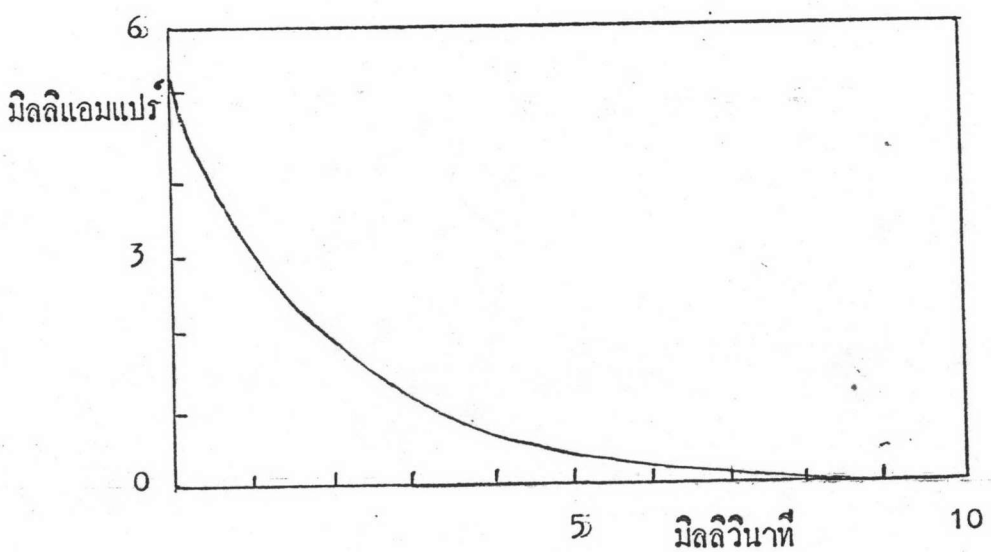
$$E - \frac{dq}{dt}R - \frac{q}{C} = 0 \qquad (2.4)$$



รูปที่ 2.2 แสดงภาพวงจรที่ประกอบด้วยตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ



รูปที่ 2.3 ก. แสดงการประจุของตัวเก็บประจุ



รูปที่ 2.3 ข. แสดงการไหลของกระแสขณะตัวเก็บประจุกำลังประจุ

จะได้ $$\ln(EC - q) = -\frac{t}{RC} + \text{const} \qquad (2.5)$$

เมื่อ $t = 0$ และ $q = 0$ ดังนั้นสมการ (2.5) จะเป็น

$$\ln EC = \text{const} \qquad (2.6)$$

แทนค่า const ในสมการ (2.5) จะได้

$$\ln(EC - q) = -\frac{t}{RC} + \ln EC$$

หรือ $$\ln \frac{EC - q}{EC} = -\frac{t}{RC}$$

นั้นคือ $$q = EC\left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) \qquad (2.7)$$

สำหรับกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรในเวลาใด ๆ หาได้จาก

$$i = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{RC}}$$

จากสมการที่ (2.7) และ (2.8) เมื่อ $t = 0$ และ $q = 0$ เริ่มแรกกระแสจะมีค่าสูงสุด แต่เมื่อ $t = \infty$, $q = EC$ และ $i = 0$ แสดงว่าเมื่อ ตัวเก็บประจุ มีประจุเต็ม จะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร จากสมการ (2.7) และ (2.8) แสดงได้ตามกราฟในรูปที่ 2.3ก และ 2.3 ข.

จากสมการ (2.7) เมื่อ $t = RC$

$$q = EC(1 - e^{-1})$$

หรือ $$q = 63\ \%\ \text{ของ}\ EC \qquad (2.9)$$

เมื่อประจุ q_o บนตัวเก็บประจุ มีค่าสูงสุดเท่ากับ EC เมื่อสับสวิตช์มายังตำแหน่ง b ตัวประจุจะเริ่มออกจากตัวเก็บประจุ ผ่านตัวต้านทาน R จะคำนวณหาจำนวนประจุที่มีอยู่ในตัวเก็บประจุในเวลาใด ๆ จะได้ว่า

$$\ln q = -\frac{t}{RC} + \text{const.} \qquad (2.10)$$

เมื่อ $t = 0$ และ $q = q_o$ แทนค่าในสมการ (2.10) หาค่า const. ได้แล้ว เอาค่า const. แทนในสมการ (2.10) จะได้

$$q = q_o e^{-\frac{t}{RC}} \qquad (2.11)$$

จำนวนตัวประจุที่อยู่ในตัวเก็บประจุจะเป็นปฏิภาคลับกับเวลา เมื่อ $t = \infty$ ตัวประจุ $q = 0$ จากสมการ (2.11) คำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรในเวลาใด ๆ ได้คือ

$$i = -\frac{E}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \qquad (2.12)$$

จากสมการ (2.12) กระแสไฟฟ้ามีเครื่องหมายลบ แสดงว่าทิศทางของกระแสไฟฟ้าไหลตรงข้ามกับครั้งแรก และเมื่อ $t = 0$ กระแสไฟฟ้าในวงจรเท่ากับ $-\frac{E}{R}$

เมื่อทราบค่าประจุไฟฟ้าในตัวเก็บประจุ และกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรจะคำนวณหาค่าความต่างศักดาไฟฟ้าที่ความต้านทาน R และที่ตัวเก็บประจุ C ได้ดังนี้

เมื่อสวิตช์อยู่ที่ตำแหน่ง a

$$V_C = E(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \qquad (2.13)$$

$$V_R = E e^{-\frac{t}{RC}} \qquad (2.14)$$

เมื่อสวิตช์อยู่ที่ตำแหน่ง b

$$V_C = Ee^{-\frac{t}{RC}} \qquad (2.15)$$

$$V_R = -Ee^{-\frac{t}{RC}} \qquad (2.16)$$

จากสมการ (2.13) แสดงว่าค่าความต่างศักดาไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุ จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลา เมื่อค่าแรงดัน E มีค่าคงที่ และสมการ (2.15) แสดงว่า จากการคายประจุของตัวเก็บประจุ ทำให้

002363

ค่าความต่างศักดาไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุจะลดลงอย่างไม่เป็นเชิงเส้น

5. วงจรขยายสัญญาณความแตกต่าง

วงจรขยายสัญญาณความแตกต่าง [4,5] ดังแสดงในรูป 2.4 ลักษณะที่สำคัญของวงจร คือการป้อนอินพุทเข้ามาทั้งขั้วอินเวอร์ติ้งอินพุท (inverting input) และนอนอินเวอร์ติ้งอินพุท (non-inverting input) ในการวิเคราะห์วงจร สมมุติให้มีเพียงอินพุทเดียว คือ V_{i2} โดยที่ V_{i1} เป็นศูนย์เอาท์พุทที่ได้จะมีค่าเป็น

$$V_{02} = -\frac{R_2}{R_1} V_{i2} \qquad (2.17)$$

ในทำนองเดียวกันสมมุติมีอินพุท V_{i1} แต่เพียงอย่างเดียว โดยที่ V_{i2} สัดวงจรจะพบว่าวงจรขยายจะเป็นวงจรขยายชนิดนอนอินเวอร์ติ้ง หรือชนิดไม่กลับเฟส (phase) สัญญาณอินพุทที่เข้าที่ขั้วนอนอินเวอร์ คือ $\frac{R_4}{R_3+R_4}(V_{i1})$ ดังนั้นเอาท์พุทที่ปรากฏจะมีค่าเป็น

$$V_{01} = (\frac{R_1 + R_2}{R_1})(\frac{R_4}{R_3 + R_4}) V_{i1} \qquad (2.18)$$

ผลรวมของเอาท์พุทคือ

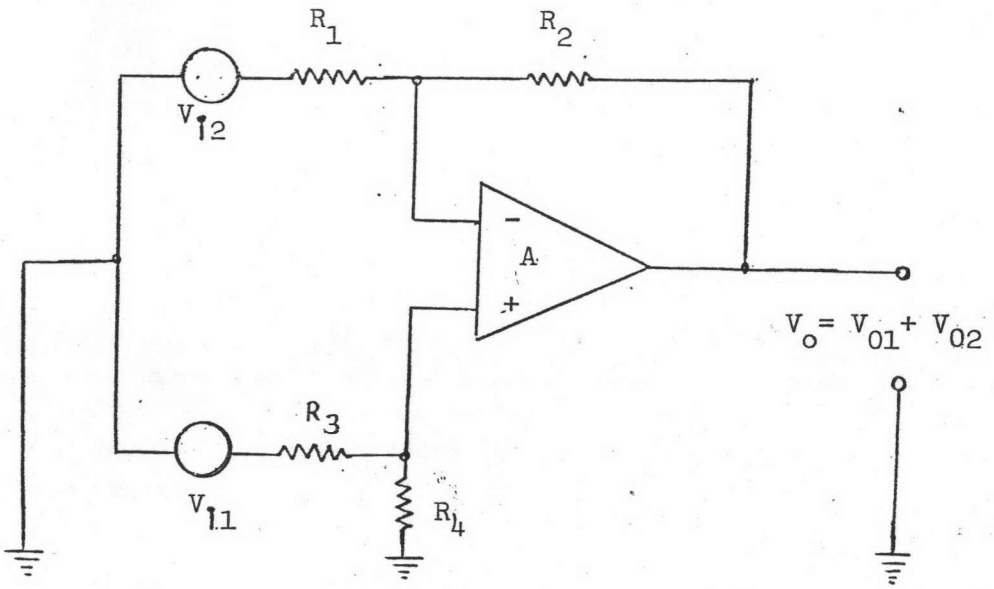
$$V_o = V_{01} + V_{02} \qquad (2.19)$$

จากสมการ (2.17) และ (2.18) แทนลงในสมการ (2.19) จะได้ว่า

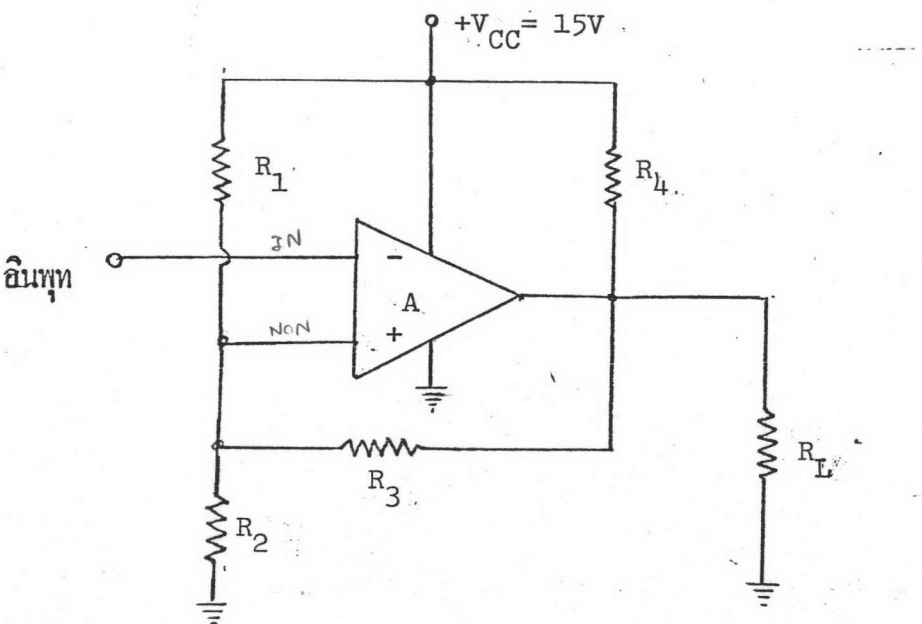
$$V_o = (\frac{R_1 + R_2}{R_1})(\frac{R_4}{R_3 + R_4}) V_{i1} - \frac{R_2}{R_1} V_{i2} \qquad (2.20)$$

จากสมการ (2.20) ในกรณีที่ $R_1 = R_3$ และ $R_2 = R_4$ จะได้ว่า

$$V_o = \frac{R_2}{R_1}(V_{i1} - V_{i2}) \qquad (2.21)$$



รูปที่ 2.4 แสดงภาพวงจรขยายสัญญาณความแตกต่าง



รูปที่ 2.5 ก. แสดงภาพวงจรเปรียบเทียบระดับแรงดันที่ให้ฮิสเทอร์เรซีส

สมการ(2.21) แสดงว่า สัญญาณเอาท์พุทที่ได้จะเป็นผลจากการขยายสัญญาณผลต่างของอินพุททั้งสอง เมื่อตัวต้านทาน R_1 และ R_2 มีค่าคงที่

6. <u>วงจรเปรียบเทียบระดับแรงดัน</u>

วงจรเปรียบเทียบใช้ในการเปลี่ยนสัญญาณอนาลอกให้เป็นสัญญาณดิจิตอล[4,5] ดังรูปที่ 2.5 ก. ตัวต้านทาน R_4 ต้องเลือกให้มีค่ามากพอเพื่อจำกัดกระแสมิให้กระแสไหลเข้าไปในตัวไอซี (I.C.) มากเกินไปในขณะเอาท์พุทอยู่สภาวะต่ำ ตัวต้านทาน R_1 และ R_2 ทำหน้าที่แบ่งแรงดัน $+V_{CC}$ เพื่อเป็นแรงดันอ้างอิง ป้อนเข้าที่อินพุททางด้าน นอนอินเวอร์ติ้ง เพื่อให้สัญญาณที่เข้ามาเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิงนี้

$V_i > V_{ee}$

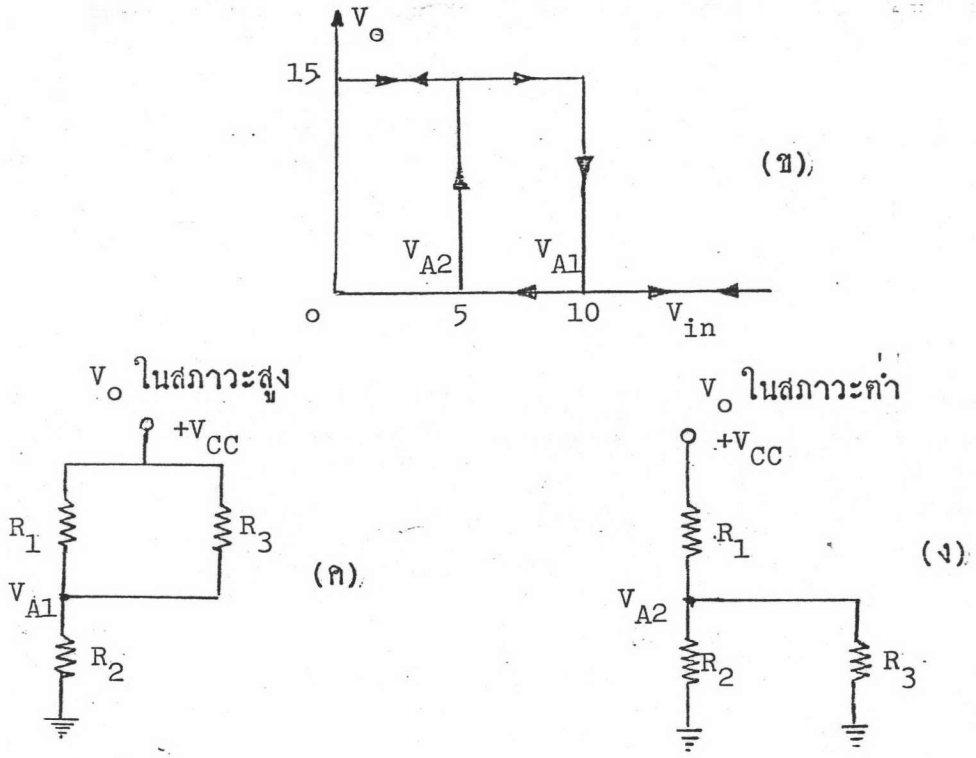
การทำงานของวงจรถ้าแรงดันอินพุทมีค่ามากกว่าแรงดันอ้างอิง ซึ่งจะทำให้อินพุทขับ (drive) เอาท์พุทมาอยู่ที่แรงดันกราวนด์ และจะทำให้แรงดันอินพุทที่ขานอนอินเวอร์ติ้งมีค่าลดลงโดยผ่านทางตัวต้านทาน R_3 ซึ่งจะทำให้เอาท์พุทยังอยู่ที่จุดอิ่มตัวที่กราวนด์ยิ่งขึ้น และการป้อนกลับเข้ามาเสริมนี้จะเป็นผลทำให้เอาท์พุทยิ่งลดค่าแรงดันหรือมีช่วงเวลาการเปลี่ยนสถานะลอจิก (logic) เร็วยิ่งขึ้น (แม้ว่าอินพุททางขาอินเวอร์ติ้งจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นก็ตาม) และมีแรงดันอินพุทค่อย ๆ ลดลงมาต่ำกว่าค่าแรงดันอ้างอิง เอาท์พุทจะแกว่งขึ้นทางแรงดัน $+V_{CC}$ ก็ยิ่งทำให้แรงดันที่นอนอินเวอร์ติ้งสูงขึ้น ทำให้การเปลี่ยนสถานะลอจิกเพิ่มความเร็วยิ่งขึ้น

จากวงจรจะเห็นได้ว่าเอาท์พุทจะเปลี่ยนสภาวะเป็นฮิสเทอร์เรซีส (hysteresis) กับแรงดันอินพุทซึ่งสามารถออกแบบได้ด้วย ตัวต้านทานป้อนกลับ R_3 และ R_2 กับการแบ่งแรงดันอ้างอิงของ $+V_{CC}$ ด้วยตัวต้านทาน R_1 และ R_2

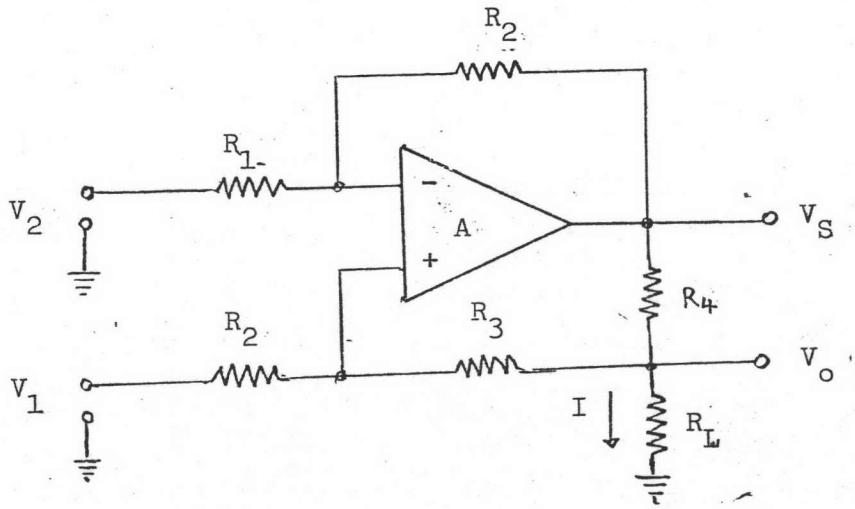
ในขณะที่เอาท์พุทอยู่ในสภาวะต่ำจะเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในสภาวะสูง เมื่ออินพุทมีค่าต่ำกว่าแรงดัน V_{A1} และเมื่อเอาท์พุทอยู่ในสภาวะสูงจะเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในสภาวะต่ำ เมื่ออินพุทเข้ามามีค่าสูงกว่า V_{A2} ค่าฮิสเทอร์เรซีสแสดงดังรูปที่ 2.5 ข.

ค่าแรงดัน V_{A1} สามารถหาค่าได้ด้วยวงจรสมมูลย์ ดังรูปที่ 2.5 ค. ซึ่งจะได้ว่า

$$V_{A1} = + \frac{V_{CC}\ R_2}{(R_1//R_3)+ R_2}$$



รูปที่ 2.5 วงจรเปรียบเทียบระดับแรงดัน (ข) ภาพแสดงการเกิดฮีสเทอร์เรซีส
(ค) วงจรสมมูลย์ ขณะเอาท์พุทอยู่สภาวะสูง
(ง) วงจรสมมูลย์ ขณะเอาท์พุทอยู่สภาวะต่ำ



รูปที่ 2.6 แสดงภาพวงจรจ่ายกระแสคงที่

นั้นคือ $$V_{A1} = + \frac{V_{CC}\, R_2(R_3 + R_1)}{R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3} \qquad (2.22)$$

ในทำนองเดียวกันสามารถหาค่าแรงดัน V_{A2} ได้ จากรูปที่ 2.5 ง. จะได้ว่า

$$V_{A2} = + \frac{V_{CC}\, R_2 // R_3}{R_1 + R_2 // R_3}$$

นั้นคือ $$V_{A2} = + \frac{V_{CC}\, R_2R_3}{R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3} \qquad (2.23)$$

ดังนั้นสามารถหาความกว้างของฮิสเทอร์เรซีสได้จาก

$$\Delta V_A = V_{A1} - V_{A2} \qquad (2.24)$$

นำสมการ (2.22) และ (2.23) แทนในสมการ (2.24) จะได้ว่า

$$\Delta V_A = + \frac{V_{CC}\, R_2R_1}{R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3} \qquad (2.25)$$

จากสมการ (2.25) แสดงให้เห็นว่าความกว้างของฮิสเทอร์เรซีสสามารถกำหนดได้ด้วยตัวต้านทานป้อนกลับ R_3 เมื่อให้แรงดันอ้างอิงคงที่คือ ถ้าต้านทาน R_1 และ R_2 คงที่ เพื่อให้แรงดันเอาท์พุท V_o มีช่วงเปลี่ยนสถานะระหว่าง $+V_{CC}$ และกราวนด์ ควรเลือกตัวต้านทาน R_4 มีค่าน้อยกว่าความต้านทานโหลด R_L และตัวต้านทาน R_3 ต้องมีค่ามากกว่าตัวต้านทาน R_4

7. <u>วงจรจ่ายกระแสคงที่</u>

วงจรจ่ายกระแสคงที่อาศัยหลักการเปลี่ยนค่าแรงดันเป็นกระแส[4,5] ดังรูปที่ 2.6 แสดงวงจรจ่ายกระแสคงที่ที่อาศัยความแตกต่างของแรงดันที่อินพุท เมื่อตัวต้านทานโหลด R_L ต่อเข้ากับกราวนด์ ที่เอาท์พุทตรง V_o จากการวิเคราะห์วงจรพบว่าแรงดันที่เอาท์พุทคือ V_S จะประกอบด้วยแรงดันที่มาจากส่วนคือ V_1 และ V_2 ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของแรงดัน

เอาท์พุทกับแรงดันอินพุท ได้คือ

$$V_S = \frac{V_1 R_3 + V_o R_1}{R_1 + R_3} \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1}\right) - V_2 \left(\frac{R_2}{R_1}\right) \qquad (2.26)$$

และแรงดันเอาท์พุท V_S ยังเขียนในเทอมของ

$$V_S = V_{R4} + V_o \qquad (2.27)$$

เมื่อ $$V_{R4} = R_4(I_{(R_1+R_3)} + I_L) \qquad (2.28)$$

และ $$I_{(R_1+R_3)} = \frac{V_o - V_1}{R_1 + R_3} \qquad (2.29)$$

นำสมการ (2.28) และ (2.29) แทนในสมการ (2.27) จะได้

$$V_S = R_4 \left(\frac{V_o - V_1}{R_1 + R_3} + I_L\right) + V_o \qquad (2.30)$$

จากสมการ (2.26) กับสมการ (2.30) ต่างเท่ากับ V_S และถ้าให้ $R_2 = R_3 + R_4$ จะได้

$$I_L = \frac{R_2}{R_1 R_4}(V_1 - V_2) \qquad (2.31)$$

พิจารณาสมการ (2.31) จะเห็นว่า เมื่อตัวต้านทาน R_1, R_2 และ R_4 คงที่ แล้ว ค่าของกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานโหลด R_L จะมีค่าขึ้นกับผลต่างของแรงดันที่อินพุททั้งสอง ถ้าต้องการให้กระแส I_L มีค่าคงที่ต้องรักษาแรงดันอินพุท V_1 และ V_2 ให้คงที่ และเมื่อต้องการเพิ่มหรือลดกระแสที่ไหลผ่านโหลด R_L กระทำได้โดยปรับค่าแรงดันอินพุท V_2 หรือ V_2