

การศึกษาสมบัติของความต้านทานจดจำทางโดเมนเวลาด้วยวงจรรอนุกรม RLC

Study on Memristor Emulator on Time domain based on RLC Circuits

อภิษฎา ทองรักษ์¹ สัณญา คุณขาว¹ กร พวง นาค¹ ปราวฤศ เหลืองประคิม² และ วันชัย จัน ไกรผล²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร sanya.k@rmutp.ac.ac.th

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ประยุกต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เพื่อศึกษาวงจรรจาลองเมมริสเตอร์ด้วยวงจรรขยายทรานคอนดักแคนซ์ ออปแอมป์ ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ วงจรรจาลองเมมริสเตอร์สามารถทดสอบที่ย่านความถี่ต่ำ 3.5Hz-30Hz สัญญาณอินพุตแบบไซน์แอมพลิจูด 5Vp-p ด้วยการทดลองร่วมกับอุปกรณ์แอกทีฟและพาสซีฟ ยิ่งไปกว่านั้นจะพบว่าวงจรรขยายทรานคอนดักแคนซ์สามารถปรับกระแสไฟฟ้าด้วยกระบวนการทางอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้วงจรรขยายทรานกระแส จากผลของการจำลองวงจรรเมมริสเตอร์พบว่ามีการลดลงและเพิ่มขึ้นด้วยการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์พาสซีฟ พบว่ามีคุณสมบัติของฮิสเทอรีซิสที่ขึ้นอยู่กับความถี่ และสามารถแสดงการเปลี่ยนค่าของตัวเก็บประจุและความฟลักซ์สนามแม่เหล็ก ผลที่ได้ของวงจรรจาลองเมมริสเตอร์ด้วย LDR แสดงพฤติกรรมของเมมคาปาซิเตอร์และเมมอินดักเตอร์ที่โดเมนเวลา นอกจากนี้ด้วยการเชื่อมต่อกับตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำอย่างอนุกรม ได้แสดงคุณลักษณะฮิสเทอรีซิสของระหว่างแรงดันอินพุตกับกระแสบางส่วนที่ไหลเข้าไปในวงจรการจดจำในการเป็นหน่วยความจำ

คำสำคัญ: วงจรรขยายทรานคอนดักแคนซ์, ประจุไฟฟ้า, ฮิสเทอรีซิส

Abstract

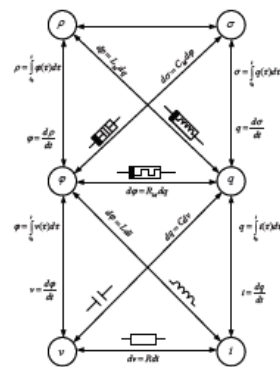
In this research to study, the emulator circuit of a memristor with available operation transconductance amplifier, an op amp resistors, capacitors, and inductors. The memristor emulator circuit can be tested by experimenting at low frequency range 3.5Hz-30Hz when the sinusoidal amplitude is 5 Vp-p with active and passive devices. Moreover, it was found that the operation transconductance amplification circuit is used to adjust the electric current by an electronic process using the mirrors current circuit. As a result of the simulation of the memristor circuit, there was a decrease and increase in the connection in the serial circuit. Found that the properties of the pinched hysteresis depend on the frequency and can show the change in the capacitor value including the magnetic flux. The results of the memristor simulation circuit with the LDR show the results of the memcapacitor and meminductor at the time domain of the circuit. In

addition to connecting the resistor, capacitors and inductors in series have shown the pinched hysteresis loop by the I-V relationship of the input voltage and segmental current inside the circuit memory recognition.

Keywords: Memristor, Emulator circuit, Pinched hysteresis loops

1. บทนำ

เมมริสเตอร์เป็นสิ่งประดิษฐ์แบบสองขั้วไฟฟ้าที่มีความต้านทานจดจำสัมพันธ์กันระหว่างฟลักซ์สนามแม่เหล็ก(Φ)กับประจุไฟฟ้า(q) ที่ไหลผ่านในตัวของเมมริสเตอร์ โดยประจุไฟฟ้านี้จะไม่สลายไปเมื่อนำสัญญาณจากแหล่งจ่ายออก[1] จากตัวเมมริสเตอร์ดั้งรูปที่ 1 ดังนั้นฟลักซ์สนามแม่เหล็กในช่วงเวลาที่ขึ้นกับประจุไฟฟ้าหรืออาจกล่าวได้ว่าพฤติกรรมของกระแสเกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าผ่านเข้าสู่เมมริสเตอร์ที่เป็นผลของการจดจำ ซึ่งเป็นองค์ประกอบของเมมริสเตอร์โดยที่เมื่อได้รับแรงดันไบอัสศักย์บวกเป็นสภาวะที่ประจุไฟฟ้าจะเคลื่อนที่จากบริเวณขั้วที่มีประจุสูงไปยังอีกด้านของขั้วไฟฟ้าที่เป็นสภาวะความต้านทานต่ำ(R_{off}) หรือการเขียนข้อมูล ในขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับที่เป็นศักย์ลบเป็นสภาวะที่ประจุไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามเป็นผลทำให้ความต้านทานสูง(R_{on})ขึ้นหรือการลบข้อมูล ซึ่งเป็นพฤติกรรมความต้านทานจดจำเมมริสเตอร์ ที่ไม่จำเป็นต้องคายพลังงานของประจุไฟฟ้า โดยที่การจดจำนี้ไม่ต้องการแรงดันไฟฟ้า ซึ่งแสดงสภาวะความจำของควมจุไฟฟ้าดังสมการที่ (1)



รูปที่ 1 ระบบพื้นฐานหน่วยความจำแรงแงและองค์ประกอบของหน่วยความจำเมมริสเตอร์

$$\sigma = \int_0^t q(\tau) d(\tau) \quad , \quad \rho = \int_0^t \varphi(\tau) d(\tau) \quad (1)$$

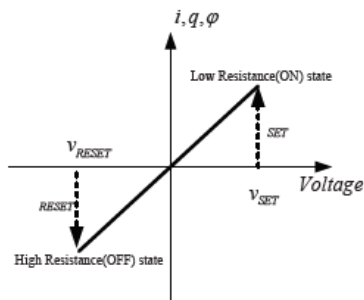
ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของเมมริสเตอร์ เมมคาปาซิเตอร์ และ เมมอินดักเตอร์ มีการเปลี่ยนแปลงทั้งสองรูปแบบจากเมมริสเตอร์ เป็นเมมคาปาซิเตอร์และเมมอินดักเตอร์ [1-2] คือ สภาพความจุไฟฟ้า และสภาพความเหนี่ยวนำ ที่สามารถอธิบายได้ด้วยฮิสเทอรีซิส รูป ที่ปรากฏขึ้นจาก ตัวแปรระหว่าง ประจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า, กระแส-แรงดันไฟฟ้า และ กระแส-ฟลักซ์แม่เหล็ก โดยความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันที่ควบคุมความจุไฟฟ้าของเมมริสเตอร์ ดังสมการที่ (2)

$$q(t) = C_M \left(\int_0^t v_c(\tau) d(\tau) \right) v(t) \quad (2)$$

และประจุไฟฟ้าที่ควบคุมความจุไฟฟ้าของเมมริสเตอร์ ดังสมการที่ (3)

$$v_c(t) = C_M^{-1} \left(\int_0^t q(\tau) d(\tau) \right) q(t) \quad (3)$$

ด้วยความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่ขึ้นกับความถี่และ สัญญาณแรงดันกระแสสลับที่เปลี่ยนแปลงตามคาบเวลา โดยที่การ ควบคุมแรงดันจะเป็นการควบคุมกระแส ประจุไฟฟ้า และฟลักซ์ แม่เหล็กตามรูปที่ 2



รูปที่ 2 สมบัติฮิสเทอรีซิสของกระแสกับแรงดันที่ได้รับสัญญาณ กระแสสลับแบบไซน์

1.1 หลักการเปลี่ยนรูประหว่าง R_M-C_M และ R_M-L_M

องค์ประกอบทางไฟฟ้าพื้นฐาน 4 แบบคือ กระแสไฟฟ้า (i) แรงดัน (v) ประจุ (q) และฟลักซ์แม่เหล็ก (φ) ที่มีการเปลี่ยนแปลงความต้านทาน จดจำเมมริสเตอร์[3-4] โดยมีความสัมพันธ์การทำงานระหว่างประจุ และฟลักซ์แม่เหล็ก ด้วยวงจรสมมูลเมมคาปาซิเตอร์หรือ เมมอินดักเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4 สามารถอธิบายได้ด้วยเงื่อนไขทาง คณิตศาสตร์ดังนี้

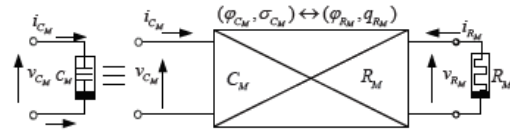
1) ความสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้า q_{R_M} และฟลักซ์

สนามแม่เหล็ก φ_{R_M} ของ Memristor คือ $R_M = \varphi_{R_M} / q_{R_M}$

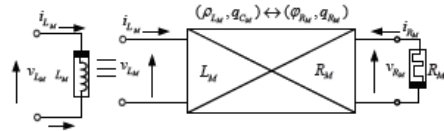
2) ความสัมพันธ์ระหว่างอินทิกรัลของประจุไฟฟ้า σ_{C_M} และฟลักซ์

สนามแม่เหล็ก φ_{C_M} ของ Memcapacitor คือ

3) ความสัมพันธ์ระหว่างอินทิกรัลของฟลักซ์แม่เหล็ก ρ_{L_M} และประจุ ไฟฟ้า q_{L_M} ของ Meminductor คือ $L_M = \rho_{L_M} / q_{L_M}$



รูปที่ 3 วงจรสมมูลระหว่างเมมริสเตอร์และเมมคาปาซิเตอร์ R_M-C_M



รูปที่ 4 วงจรสมมูลระหว่างเมมริสเตอร์ และเมมอินดักเตอร์ R_M-L_M

ดังนั้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง

φ_{R_M} และ q_{R_M} ใน Memristor, φ_{C_M} และ σ_{C_M} ใน Memcapacitor และ q_{L_M} และ ρ_{L_M} ใน Meminductor ดังนี้

$$\begin{aligned} d\varphi_{R_M} &= R_M dq_{R_M} \Leftrightarrow dq_{R_M} = \frac{1}{R_M} d\varphi_{R_M} \\ d\varphi_{C_M} &= \frac{1}{C_M} d\sigma_{C_M} \Leftrightarrow dq_{L_M} = \frac{1}{L_M} d\rho_{L_M} \end{aligned} \quad (4)$$

จากสมการที่ (4) แสดงถึงความสัมพันธ์ของฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่ ขึ้นต่อกันระหว่างของเมมริสเตอร์ R_M และเมมคาปาซิเตอร์ C_M รวมทั้งความสัมพันธ์ของประจุไฟฟ้าที่ขึ้นต่อกันระหว่างของเมม ริสเตอร์ R_M และเมมอินดักเตอร์ L_M ได้ดังนี้

$$R_M - C_M : \left\{ \begin{array}{l} \varphi_{R_M} = \varphi_{R_M}(q_{R_M}) \\ \varphi_{C_M} = \varphi_{C_M}(\sigma_{C_M}) \end{array} \right\} : R_M - L_M : \left\{ \begin{array}{l} q_{R_M} = q_{R_M}(\varphi_{R_M}) \\ q_{L_M} = q_{L_M}(\rho_{L_M}) \end{array} \right\} \quad (5)$$

ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง เมมคาปาซิ ตอร์ C_M และเมมอินดักเตอร์ L_M ได้ดังนี้

$$R_M - C_M : \left\{ \begin{array}{l} \varphi_{R_M} = k_{XC} \varphi_{C_M} \\ q_{R_M} = k_{YC} \sigma_{C_M} \end{array} \right\} : R_M - L_M : \left\{ \begin{array}{l} q_{R_M} = k_{XL} q_{L_M} \\ \varphi_{R_M} = k_{YL} \rho_{L_M} \end{array} \right\} \quad (6)$$

เมื่อตัวแปรของ k_{XC} , k_{YC} , k_{XL} และ k_{YL} เป็นค่าคงที่ดังนั้นเมื่อทำการอินทิ กรัลที่สมการที่ (6) ในทุกเทอม จะได้

$$\begin{aligned} R_M - C_M : \left\{ \begin{array}{l} \varphi_{R_M} = k_{XC} \varphi_{C_M} \\ q_{R_M} = k_{YC} \sigma_{C_M} \end{array} \right\} &= k_{YC} \int i_{C_M} dt \\ R_M - L_M : \left\{ \begin{array}{l} q_{R_M} = k_{XL} q_{L_M} \\ \varphi_{R_M} = k_{YL} \rho_{L_M} \end{array} \right\} &= k_{YL} \int v_{L_M} dt \end{aligned} \quad (7)$$

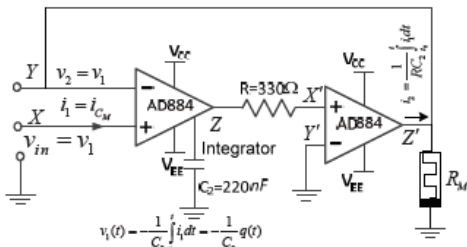
สมการที่ (7) เป็นเป็นการยืนยันให้ทราบถึงการสะท้อนของเมมริ สเตอร์และเมมคาปาซิเตอร์ หรือ เมมอินดักเตอร์ ดังรูปที่ 3 และ 4 ซึ่ง ความสัมพันธ์ที่ปรากฏนี้แสดงถึงเมมคาปาซิเตอร์ และ เมมอินดักเตอร์

2. การออกแบบวงจร R_M-C_M และ R_M-L_M

2.1 วงจรจำลองเมมคาปาซิเตอร์ R_M-C_M

การออกแบบวงจรจำลองเมมคาปาซิสเตอร์และเมมอินดักเตอร์ R_M-C_M ด้วยวงจรมอดูลความนำถ่ายไอออน (Operational Transconductance Amplifier: OTA) ดังรูปที่ 5 โดยการใช้ AD884 ที่มีส่วนของวงจรสะท้อนกระแสที่เปลี่ยนแรงดันที่ v_{CM} ไปเป็น v_{RM} ดังนั้น $v_{RM} = k_{XC} v_{CM}$ เมื่อกำหนดให้ $k_{XC} = 1$ กระแส i_{CM} จะไหลเข้าสู่ด้านอินพุตที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำที่ขา X ที่ผ่านเข้าสู่ขา Z ภายหลังจากที่ตัวเก็บประจุ C ได้เปลี่ยนกระแสให้เป็นแรงดันไฟฟ้า $v_{CM} = -\frac{1}{C} \int i_{CM} dt$ ร่วมกับวงจรจำลองการทำงานเมมริสเตอร์ (R_M) ของการเปลี่ยนสถานะด้วย LDR ที่ได้รับการกระตุ้นทางแสง จากนั้นวงจรมอดูลความนำถ่ายไอออนในลำดับที่สองจะทำการเปลี่ยนเป็นกระแสไฟฟ้า i_{RM} ได้ดังนี้

$$i_{RM} = \frac{1}{R_C} \int i_{CM} dt = k_{YC} \int i_{CM} dt \quad (8)$$



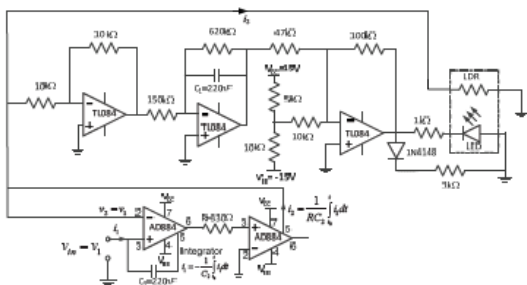
รูปที่ 5 วงจรจำลองการกวด R_M-C_M

กำหนดให้ $k_{YC} = 1$ แสดงความสัมพันธ์เมมคาปาซิสแดนซ์ R_M-C_M ได้ดังนี้

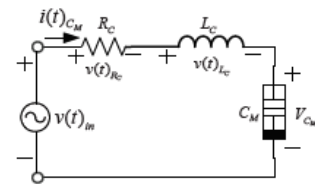
$$C_M = \frac{dC_{CM}}{d\phi_{CM}} = \frac{k_{XC} q_{RM}}{k_{YC} \phi_{RM}} = \frac{k_{XC}}{k_{YC} R_M} = \frac{R_C}{R_M} \quad (9)$$

2.2 วงจรอนุกรม R-L-C_M

การเชื่อมต่อวงจรมอดูลเพื่อทำการหาค่าเมมคาปาซิสแดนซ์จากวงจรจำลองเมมริสเตอร์ด้วย LDR ดังรูปที่ 6 กำหนดให้สัญญาณแรงดันอินพุตเป็น sinusoidal แรงดันอินพุต 5Vpp ที่ความถี่ค่า 3-15Hz ซึ่งสามารถเขียนด้วยวงจรมอดูล R-L-C_M ดังรูปที่ 7 ที่เป็นวงจรมอดูลไม่เป็นเชิงเส้น กำหนดให้ $R_L = R_C = 10k\Omega, L_C = 15H, C_L = 10\mu F$ ผลการวัดกระแสกับแรงดันเพื่อศึกษาสมบัติของฮิสเทอรีซิสลูปในช่วงความถี่ที่กำหนดและแรงดันอินพุต sinusoidal พบว่าสัญญาณเอาต์พุตของประจุและแรงดันไฟฟ้า ในขณะที่เกิดการอัดประจุและคายประจุของกราฟฮิสเทอรีซิสลูปแสดงความเป็นหน่วยความจำของตัวต้านทานจลจจำ ผลของประจุไฟฟ้าและแรงดันอินพุตดังรูปที่ 8

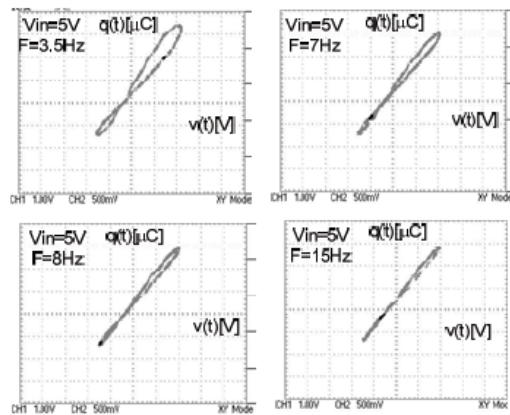


รูปที่ 6 วงจรจำลองการกวด R_M-C_M ของวงจรมอดูลเมมริสเตอร์

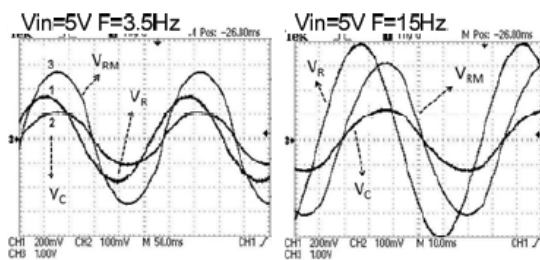


รูปที่ 7 วงจรมอดูลอย่างอนุกรม R-L-C_M

พบว่าแรงดัน v_{CM} จะไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ตามปกติ กลไกนี้เป็นลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นของหน่วยความจำตัวเก็บประจุจลจจำ และความสัมพันธ์ทางเฟสในการวัดที่ความถี่ต่ำของสัญญาณไซน์ดังรูปที่ 9 โดยที่ความถี่จะเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อ การเปลี่ยนเฟสจะแคบมากจน ประจุไฟฟ้ามีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับแรงดันอินพุต



รูปที่ 8 ฮิสเทอรีซิสลูปของวงจรมอดูลเมมคาปาซิสแดนซ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ความถี่ถึงที่



รูปที่ 9 สัญญาณ v_{RM}, v_{CR}, v_{LR} วงจรมอดูล R-L-C_M ที่แรงดันอินพุต $v_{in} = 5 V_{pp}, f = 3.5-15 Hz,$

2.3 วงจรจำลองเมมอินดักเตอร์ R_M-L_M

การออกแบบการวัดทดสอบเมมอินดักแดนซ์ R_M-L_M ด้วย AD884 โดยกำหนดให้แรงดันที่ขา inverting และ non-inverting มีค่า ($V_X = V_Y, V_Z = output, i_Z = i_X$) แสดงในรูปที่ 10 ที่มีภาระสะท้อนกระแสตามโครงสร้างที่ตัวอุปกรณ์ในตำแหน่ง X, Y, Z และด้านเอาต์พุต จากวงจรจะพบว่ากระแส i_{LM} เป็นกระแสที่ไหลผ่านเข้าสู่วงจรมอดูลเมมคาปาซิสเตอร์ที่มีค่าเท่ากับกระแสที่ผ่าน R_L และเป็นสัดส่วนที่โดยตรงกับ i_{RM} ซึ่งเป็นกระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน R_M

$$i_{L_M} = i_1 = \frac{(0 - v_X)}{R_1}, i_{R_M} = i_3 = \frac{(0 - v_Y)}{R_3} = \frac{(0 - v_X)}{R_3} \quad (10)$$

จากสมบัติของ AD844 ที่มีสมบัติของ integrator ของแรงดันและการสะท้อนกระแสดังนี้

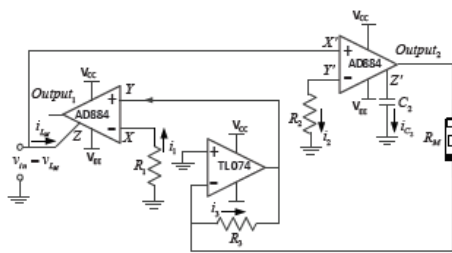
$$v_{L_M} = v_Z = v_Y = v_X \quad (11)$$

$$i_2 = \frac{(v_X - 0)}{R_2} = \frac{(v_{L_M} - 0)}{R_3} = i_{C_2} \quad (12)$$

$$v_{L_M} = v_{output} = v_Z = \frac{1}{C_2} \int i_{C_2} dt = \frac{1}{R_2 C_2} \int v_{L_M} dt \quad (13)$$

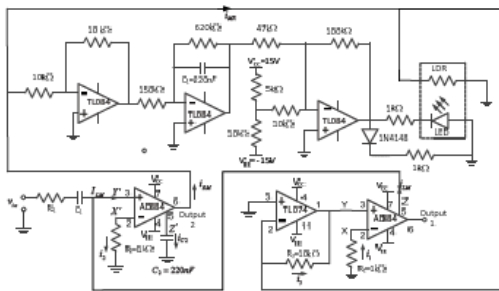
ดังนั้นเมื่อแทนค่าของพารามิเตอร์ลงใน AD844 ตัวที่สองจะพบว่าที่ X', Y', Z' และ $output'$ มีค่าของ $k_{XL} = R_1/R_3, k_Y = 1/R_2 C_2$ สามารถเขียนความสัมพันธ์เมมอินดักแตนซ์จาก R_M-L_M ได้ดังนี้

$$L_M = \frac{d \rho L_M}{dq L_M} = \frac{k_{XL} \rho_{RM}}{k_{YL} q_{RM}} = \frac{k_{XL}}{k_{YL}} \frac{R_1 R_2 C_2}{R_3 R_M} \quad (14)$$

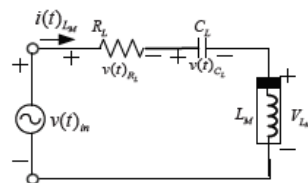


รูปที่ 10 วงจรจำลองการเปลี่ยนจาก R_M-L_M

การเชื่อมต่อวงจรอนุกรมเพื่อทำการหาค่าเมมอินดักแตนซ์จากวงจรจำลองเมมริสเตอร์ด้วย LDR ดังรูปที่ 11 เมื่อกำหนดให้สัญญาณแรงดันอินพุตเป็น sinusoidal แรงดัน 5Vpp ที่ความถี่ต่ำ 5-15Hz สามารถเขียนด้วยวงจรสมมูล R-C- L_M ดังรูปที่ 12 ที่เป็นวงจรสมมูลแบบไม่เป็นเชิงเส้นกำหนดให้ $R_L = 10k\Omega, C_L = 10\mu F$ การควบคุมพัลส์ซ์เพื่อให้ทราบแรงดันที่สัมพันธ์กันกับพัลส์ซ์ที่ได้นำมาใช้ในการศึกษา พบว่าผลของแรงดันนั้นสัมพันธ์กันกับการควบคุมพัลส์ซ์ซึ่งจะเป็นการควบคุม memductance ที่สถานะของส่วนวงจร integrator ด้วย AD844

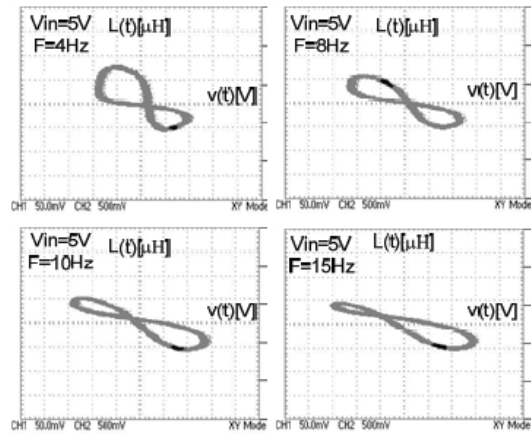


รูปที่ 11 แผนภาพวงจรพื้นฐานของเมมริสเตอร์

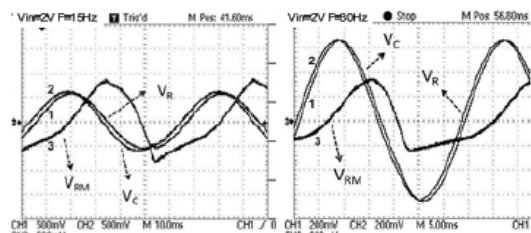


รูปที่ 12 วงจรสมมูลอย่างอนุกรม R-C- L_M

ที่อาศัยวงจรจำลองการทำงานของเมมริสเตอร์ด้วย LDR ได้ถูกนำมาใช้เพื่อทดสอบประสิทธิภาพที่เหมาะสม ซึ่งเป็นวิธีการที่ง่ายต่อการควบคุมการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำจลจ



รูปที่ 13 ฮิสเทอรีซิสลูปของวงจรจำลองเมมริสเตอร์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ที่ความถี่ดังนี้



รูปที่ 14 สัญญาณ v_{RM}, v_C, v_R ของวงจร R- L_M -C ที่ $v_{in} = 5$ Vpp

3. สรุป

จากการศึกษาถึงวงจรอนุกรม R- L_M -C และ R- L_M -C ที่ถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณ sinusoidal ที่ความถี่ต่างๆ และขนาดแอมพลิจูด ได้แสดงผลของฮิสเทอรีซิสตามอย่างทฤษฎี ซึ่งแสดงพฤติกรรมของหน่วยความจำในเมมคาปาซิแตนซ์และเมมอินดักแตนซ์

เอกสารอ้างอิง

- [1] L. O. Chua, "Memristor-the missing circuit element," IEEE Transactions on Circuit Theory, vol. CT-18, pp. 507-511, 1971.
- [2] T. A. Wey, W. D. Jemison, "Variable gain amplifier circuit using titanium dioxide Memristors," IET Circuits Devices and Systems, vol. 5, pp. 59-65, 2011.
- [3] Y. Ho, G. M. Huang, P. Li, "Dynamic properties and design analysis for nonvolatile Memristor memories," IEEE Transactions on Circuits and Systems": Reg. Papers, vol. 58, pp. 724-736, 2011.
- [4] X.-Y. Wang, A. L. Fitch, H. C. Lu, V. Sreeram, W.-G. Qi "Implementation of an analogue model of a Memristor based on a light-dependent resistor," Chinese Physics B, vol. 21, pp. 1-8, 2012.