บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 16

16th Conference of Electrical Engineering Network 2024 (EENET 2024)

วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำขนานตัวต้านทานแบบลบเทียบกราวด์ที่สามารถปรับค่าได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้ CDCTA

Electronically Adjustable Grounded Inductance Simulator Paralleled with Negative Resistance Using CDCTA

ธนวัฒน์ เฉลิมพงษ์ [1] โกศล พิทักษ์สัตยาพรต [1*] ภัทธาวุธ วงศ์ศักดิ์ [1] กานต์ อัมพานนท์ [1]

กฤษฎิ์พนธ์ พรรรตนชัย [1] และ วินัย ใจกล้า [2]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และระบบอัตโนมัติ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

83 หมู่ที่ 12 ตำบลสะเดียง อำเภอเมือง จังหวัดเพชรบูรณ์ 67000 E-mail: koson.p@pcru.ac.th

[2]ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการสังเคราะห์และออกแบบวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำขนานตัวต้านทานแบบลบเทียบกราวน์ วงจรประกอบด้วย CDCTA จำนวน 1 ตัว และตัวเก็บประจุต่อลงกราวน์อีก 1 ตัว โดยไม่มีตัวต้านทานในวงจรและการกำหนดแมทชิงคอนดิชั่น การควบคุมค่าความเหนี่ยวนำและค่าความต้านทานแบบลบทำได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ วงจรที่นำเสนอจึงเหมาะที่จะนำไปสร้างเป็นวงจรรวม ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE พบว่าวงจรทำงานได้สอดคล้องกับที่คาดการณ์ไว้ตามทฤษฎีโดยอยู่ในช่วงความถี่ประมาณ 1 kHz ขึ้นไป นอกจากนี้ยังได้นำเสนอการประยุกต์ใช้งานวงจรที่สังเคราะห์ขึ้นในวงจรกำเนิดสัญญาณซายน์

คำสำคัญ: วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ, ความต้านทานแบบลบ, CDCTA

Abstract

The synthesis and design of grounded paralleled inductance with a negative resistance simulator are presented in this article. There are no resistors or matching-conditioning devices in the circuit; it only has 1 CDCTA and 1 grounded capacitor. The proposed circuit is ideal for an integrated circuit since it can electronically adjust the inductance and negative resistance values. The PSPICE simulation's results demonstrated that the circuit operated as predicted by the theory in the frequency range of about 1 kHz or more. It also provides sinusoidal signal generator-generated circuit applications.

Keywords: inductance simulator, negative resistance, CDCTA

1. บทนำ

งานวิจัยด้านวิศวกรรมโทรคมนาคมและระบบการสื่อสารวงจรประมวลผลสัญญาณแอนะล็อกมีความสำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านนี้เป็นอย่างมาก [1] การใช้วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบเทียบกราวด์เป็นหัวข้อวิจัยด้านหนึ่งที่ได้รับความสนใจเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีให้ดียิ่งขึ้นไปอย่างแพร่หลาย มีการพัฒนาวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำอนุกรมหรือขนานตัวต้านทานแบบลบเทียบกราวด์เพื่อใช้ประโยชน์ในการกำจัดตัวอุปกรณ์แฝง การแมทชิ่งอิมพีแดนซ์ และการกำเนิดสัญญาณซายน์ในวงจรออสซิลเลเตอร์ [2-4] โดยใช้อุปกรณ์แอกทีฟที่หลากหลายในการออกแบบวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ [4-10] ได้แก่ voltage differencing current conveyor (VDCC) [4],current feedback operational amplifier (CFOA) [5,6], current follower transconductance amplifiers (CFTA) [7], differential voltage current conveyor (DVCC) [8,9], differential voltage to current converter (DVTC) [10] อย่างไรก็ตามยังมีข้อด้อยที่เกิดขึ้นจากการออกแบบวงจรดังนี้

- ใช้อุปกรณ์แอกทีฟมากกว่าหนึ่งตัว [6,9,10]
- ค่าความเหนี่ยวนำไม่สามารถปรับได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ [5,6,8,9,10]
- จำเป็นต้องมีการกำหนดแมทชิ่งคอนดิชั่น [6,9]
- ใช้ตัวต้านทานประกอบในวงจร [4,5,6,7,8,9,10]
- ใช้ตัวเก็บประจุแบบลอย [5,7]

โดยไม่นานมานี้ได้มีผู้เสนออุปกรณ์แอกทีฟชนิดใหม่ชื่อว่า current differencing cascaded transconductance amplifier (CDCTA) อุปกรณ์แอกทีฟ CDCTAได้รับความนิยมและได้มีการนำ ไปใช้อย่าง

แพร่หลายในการออกแบบวงจรประมวลผลสัญญาณแอนะล็อกต่างๆ เช่น วงจรกรองสัญญาณแบบหนึ่งอินพุตหลายเอาต์พุต, วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นซายน์ครอเดรเจอร์, วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นซายน์หลายเฟส

2. หลักการทำงานของวงจร

2.1 หลักการของ CDCTA

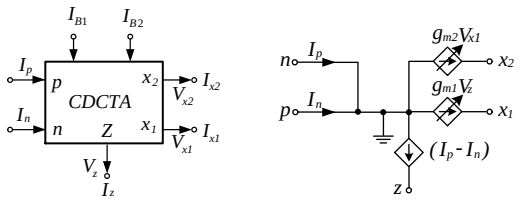
เนื่องจากวงจรที่นำเสนอประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักคือ CDCTA หัวข้อนี้จึงขอกล่าวถึง CDCTA พอสังเขป ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของ CDCTA แสดงด้วยสมการเมตริกซ์ดังนี้

$$\begin{bmatrix} I_z \\ I_{x1}, I_{x1C} \\ I_{x2} \\ V_{x2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_{m1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g_{m2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_p \\ I_n \\ V_z \\ V_{x1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

ค่าความนำถ่ายโอนของ CDCTA คือค่า g_m สามารถปรับค่าได้โดยค่ากระแสไบอัสจากภายนอก I_B สำหรับโครงสร้าง CDCTA ที่มีโครงสร้างเป็นทรานซิสเตอร์ ค่าความนำถ่ายโอนสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2) และ (3) โดยสัญลักษณ์และวงจรสมมูลของ CDCTA แสดงได้ดังรูปที่ 1

$$g_{m1} = \frac{I_{B1}}{2V_T} \quad (2)$$

$$g_{m2} = \frac{I_{B2}}{2V_T} \quad (3)$$



(ก) (ข)

รูปที่ 1 CDCTA (ก) สัญลักษณ์ (ข) วงจรสมมูล

2.2 วงจรที่นำเสนอ

วงจรที่นำเสนอเป็นวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งวงจรประกอบไปด้วย CDCTA จำนวน 1 ตัว และตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวด์อีก 1 ตัว วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำที่นำเสนอเมื่อพิจารณา CDCTA ในอุดมคติ ซึ่งจะได้สมการอิมพีแดนซ์ของวงจรที่นำเสนอดังนี้

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{Cs}{g_{m1}g_{m2}} // \frac{-1}{g_{m1}} \quad (4)$$

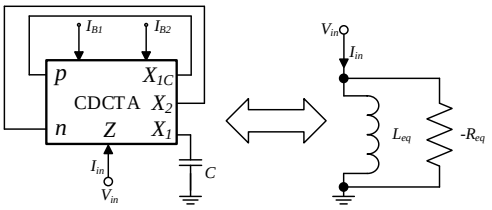
จากสมการที่ (4) สามารถเขียนได้เป็น

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{4V_T^2 Cs}{I_{B1}I_{B2}} // \frac{-2V_T}{I_{B1}} \quad (5)$$

$$L_{eq} = \frac{4V_T^2 C}{I_{B1}I_{B2}} \quad (6)$$

$$-R_{eq} = \frac{2V_T}{I_{B1}} \quad (7)$$

จากสมการที่ (6) และ (7) พบว่าการปรับค่าความเหนี่ยวนำและค่าความต้านทานติดลบของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำที่นำเสนอได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ผ่านกระแสไบอัสภายนอก I_B



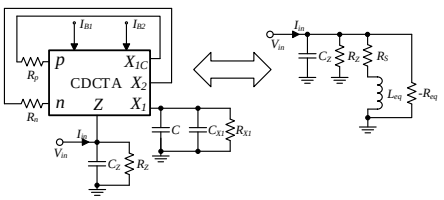
รูปที่ 2 วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำที่นำเสนอ

2.3 การวิเคราะห์วงจรในกรณีไม่เป็นอุดมคติ

ในกรณีที่ CDCTA เกิดความไม่เป็นอุดมคติสามารถวิเคราะห์และแสดงได้ตามสมการต่อไปนี้

$$I_z = \alpha_p I_p - \alpha_n I_n;\ I_{x1} = \beta_1 g_{m1} V_z;\ I_{x2} = \beta_2 g_{m2} V_{x1} \quad (8)$$

เมื่อพารามิเตอร์ $\alpha_p, \alpha_n, \beta_1$ และ β_2 คือค่าผิดพลาดของการส่งผ่าน กระแสหรือแรงดันจากอินพุตผ่านไปยังเอาต์พุต โดยมีตัวต้านทานและตัวเก็บประจุแฝงปรากฏอยู่ที่ขั้ว p, n, Z, X_1 และ X_2 ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำที่นำเสนอกรณีไม่เป็นอุดมคติ

เมื่อพิจารณา R_p และ R_n มีค่าต่ำเข้าใกล้ศูนย์จะได้อิมพีแดนซ์ของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำดังนี้

$$\frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{1}{C_Z s} // R_Z // \frac{(C + C_{X1})s + (1/R_{X1})}{\alpha_p \alpha_n \beta_1 \beta_2 g_{m1} g_{m2}} // \frac{-}{\alpha_p \beta_1 g_{m1}} \quad (9)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (9) ตัวเหนี่ยวนำกับตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมกันโดยมีตัวต้านทานค่าลบขนานอยู่มีค่าดังนี้

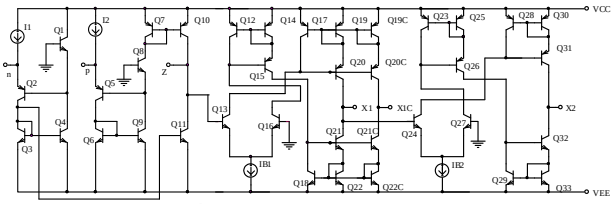
$$R_S = \frac{1/R_{X1}}{\alpha_p\alpha_n\beta_1\beta_2 g_{m1}g_{m2}} \tag{10}$$

$$L_{eq} = \frac{(C+C_{X1})s}{\alpha_p\alpha_n\beta_1\beta_2 g_{m1}g_{m2}} \tag{11}$$

$$-R_{eq} = \frac{1}{\alpha_p\beta_1 g_{m1}} \tag{12}$$

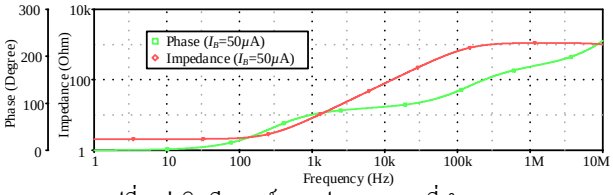
2.4 ผลการจำลองการทำงาน

เพื่อเป็นการยืนยันและทดสอบสมรรถนะของวงจรที่นำเสนอ จึงได้จำลองการทำงานของวงจรผ่านโปรแกรม PSPICE สำหรับทรานซิสเตอร์ชนิด PNP และ ชนิด NPN ที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจรได้ใช้พารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์เบอร์ PR200N และ NR200N ตามลำดับ ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์อาร์เรย์ ALA400 ของ AT&T CDCTA ที่จำลองการทำงานใช้โครงสร้างเทคโนโลยีไบโพล่า ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยป้อนแรงดันไฟเลี้ยงวงจร ±2.5V

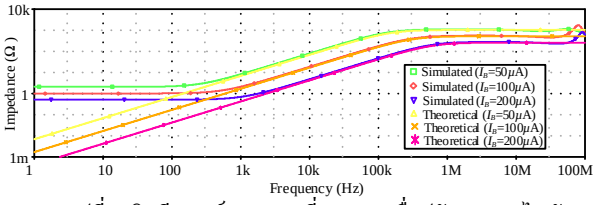


รูปที่ 4 โครงสร้างภายใน CDCTA

เมื่อกำหนดค่า $I_{B1} = I_{B2} = I_B = 50$ μA และ $C = 1$nF ได้ค่าความเหนี่ยวนำ 1.3 mH ค่าความต้านทานที่ขนานกับตัวเหนี่ยวนำ 1.04 kΩ โดยมีอิมพีแดนซ์รวมและเฟสแสดงในรูปที่ 5 โดยเมื่อปรับกระแสไบอัส I_B ด้วยค่า 50 μA, 100 μA และ 200 μA ตามลำดับ ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำที่นำเสนอมีค่า 1.3 mH, 281.4 μH และ 69 μH ตามลำดับ ได้ค่าความต้านทานขนานกับตัวเหนี่ยวนำมีค่า 1.11 kΩ, 540.20 Ω, และ 245.36 Ω โดยค่าที่ได้ตามทฤษฎีจากการสมการที่ (6) และ (7) ความเหนี่ยวนำมีค่า 1.1 mH, 270.4 μH และ 67.6 μH ตามลำดับ ได้ค่าความต้านทานขนานกับตัวเหนี่ยวนำมีค่า 1.04 kΩ, 520 Ω และ 260 Ω ซึ่งค่าที่ได้จากการจำลองใกล้เคียงกับทฤษฎีโดยอยู่ในช่วงความถี่ประมาณ 1 kHz ขึ้นไป ดังแสดงในรูปที่ 6

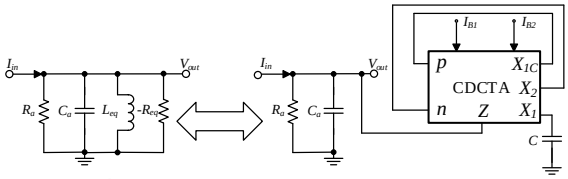


รูปที่ 5 ค่าอิมพีแดนซ์และเฟสของวงจรที่นำเสนอ



รูปที่ 6 อิมพีแดนซ์ของวงจรที่นำเสนอเมื่อปรับกระแสไบอัส

เพื่อเป็นการยืนยันผลโดยการประยุกต์ใช้ในวงจรกำเนิดสัญญาณซายน์แบบอาร์แอลซีขนาน โดยมีวงจรแสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 วงจรกำเนิดสัญญาณซายน์แบบอาร์แอลซีขนาน

จากวงจรรูปที่ 7 จะได้ทรานส์เฟอร์ฟังชั่นแรงดันเอาต์พุตต่อกระแสอินพุตดังนี้

$$\frac{V_{out}}{I_{in}} = \frac{s\left(\frac{1}{C_a}\right)}{s^2 + \frac{\left(R_{eq}-R_a\right)}{R_{eq}R_aC_a}s + \frac{1}{C_aL_{eq}}} \tag{13}$$

จากสมการที่ (13) จะได้ค่าความถี่การกำเนิดสัญญาณ (Oscillation Frequency: OF) และเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณ (Oscillation Condition: OC) ดังนี้

$$\text{OF:}\quad \omega_{osc} = \sqrt{\frac{1}{C_aL_{eq}}} \tag{14}$$

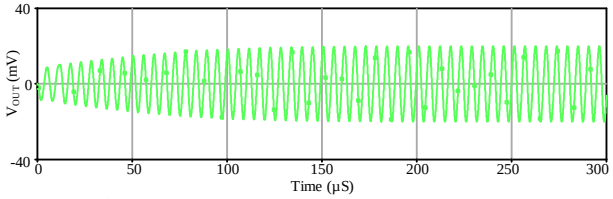
$$\text{OC:}\quad R_a \geq \frac{1}{g_{m1}} \tag{15}$$

เมื่อแทนสมการที่ (6) และ (7) ในสมการที่ (14) และ (15) จะได้ OF และ OC ดังนี้

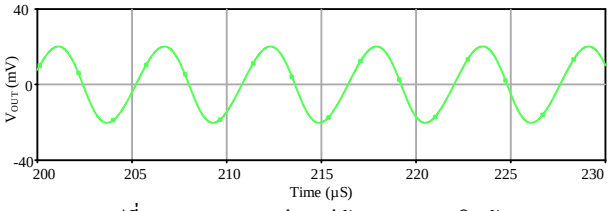
$$\text{OF:}\quad \omega_{osc} = \sqrt{\frac{I_{B1}I_{B2}}{4V_T{}^2CC_a}} \tag{16}$$

$$\text{OC:}\quad R_a \geq \frac{2V_T}{I_{B1}} \tag{17}$$

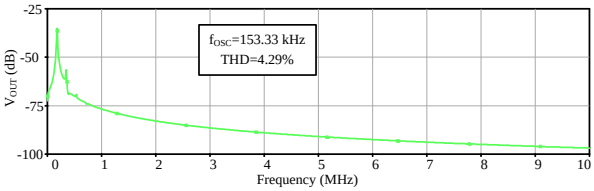
เมื่อกำหนดค่า $C = 1$ nF, $R_a = 1.14$ kΩ และ $C_a = 1$ nF โดยปรับ $I_{B1} = I_{B2} = 50$ μA จะได้ค่าความถี่สัญญาณ $f_{OSC} = 153.33$ kHz และ THD = 4.29 % ดังแสดงผลในรูปที่ 8-10 โดยค่าที่คำนวณได้ตามสมการที่ (16) ได้ค่า $f_{OSC} = 183.33$ kHz ซึ่งมีค่าความผิดพลาด 16.36 %



รูปที่ 8 ผลตอบสนองช่วงเริ่มต้นของการกำเนิดสัญญาณ



รูปที่ 9 ผลตอบสนองช่วงอยู่ตัวของการกำเนิดสัญญาณ



รูปที่ 10 เสปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต

3. สรุป

บทความนี้นำเสนอการออกแบบวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบเทียบกราวด์ โดยใช้ CDCTA เป็นอุปกรณ์แอกทีฟ เนื่องจากสามารถควบคุมการทำงานได้ด้วยกระแสไบอัสจากภายนอกทำให้สามารถควบคุมการทำงานได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ โครงสร้างของวงจรที่นำเสนอประกอบไปด้วย CDCTA จำนวน 1 ตัวและตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวนด์ 1 ตัวโดยไม่ใช้ตัวต้านทานภายนอก และมีการนำวงจรที่นำเสนอไปประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณซายน์แบบอาร์แอลซีขนานโดยแรงดันเอาต์พุตให้ผลที่ใกล้เคียงสอดคล้องกับการคำนวณทางทฤษฎี

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และระบบอัตโนมัติ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ ที่ให้การสนับสนุนและความช่วยเหลือในการจัดทำบทความนี้ซึ่งได้ช่วยให้บทความนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

[1] พิพัฒน์ พรหมมี, “วงจรรวมแบบแอนะล็อกสำหรับการสื่อสาร ,” คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, 2560.

[2] M. A. Al-Absi and M. T. Abuelma’atti, “A Novel Tunable Grounded Positive and Negative Impedance Multiplier,” IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, vol. 66, pp. 924-927, 2019.

[3] Z. Xia, M. Li, and Z. Qi, “Realizing wideband negative inductor using current feedback amplifier,” Microwave and Optical Technology Letters, vol. 58, pp. 1723-1728, 2016.

[4] F. Kaçar, A. YeŞil, S. Minaei, and H. Kuntman, “Positive/negative lossy/lossless grounded inductance simulators employing single VDCC and only two passive elements,” AEU-International Journal of Electronics and Communications, vol. 68, pp. 73-78, 2014.

[5] H. Alpaslan and E. Yuce, “Inverting CFOA based lossless and lossy grounded inductor simulators,” Circuits, Systems, and Signal Processing, vol. 34, pp. 3081-3100, 2015.

[6] M. Dogan and E. Yuce, “CFOA based a new grounded inductor simulator and its applications,” Microelectronics Journal, vol. 90, pp. 297-305, 2019.

[7] M. E. BaŞak and E. Özer, “Electronically tunable grounded inductance simulators and capacitor multipliers realization by using single Current Follower Transconductance Amplifier (CFTA),” Analog Integrated Circuits and Signal Processing, vol. 112, pp. 401-415, 2022.

[8] A. Abaci and E. Yuce, “Modified DVCC based quadrature oscillator and lossless grounded inductor simulator using grounded capacitor (s),” AEU-International Journal of Electronics and Communications, vol. 76, pp. 86-96, 2017.

[9] E. Yuce, H. Alpaslan, S. Minaei, and U. E. Ayten, “A new simulated grounded inductor based on two NICs, two resistors and a grounded capacitor,” Circuits, Systems, and Signal Processing, vol. 40, pp. 5847-5863, 2021.

[10] N. Likhitkitwoerakul, N. Roongmuanpha, and W. Tangsrirat, “DVTC-Based Series RL/RC Impedance Simulator,” 9th International Electrical Engineering Congress (iEECON), 2021, pp. 321-324.