

แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงระดับนาโนแอมป์ควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์

Nanoamp-level DC Current Power Supply Controlled by Microcontroller

อริสรา ลือวิสุทธิชาติ, เกลิมพันธุ์ แซ่มซ้อย, ธนัท หงษ์เทียรสฤติย์, ธิตินุฒิ เรือนทอง, ณัฐพงศ์ ธัญญรัตน์สกุล, อภิวัฒน์ ต้นทอง
ปวิช ช้อยขุนทด และ ภาณุร ศิลาพันธ์*

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะ
วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
* ผู้รับผิดชอบบทความ
silapan_p@su.ac.th

Received: 31 May 2022
Revised: 11 Aug 2022
Accepted: 23 Aug 2022

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแหล่งจ่ายกระแสตรงระดับนาโนแอมป์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ตัวเครื่องประกอบด้วยสองส่วนคือ วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส โดยใช้ไอซีเบอร์ AD844 และส่วนวงจรภาคควบคุมแหล่งจ่ายถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในการทดลองในการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องใช้แหล่งจ่ายกระแสค่าคงที่และสามารถปรับค่าได้เพื่อให้การทดลองเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นโดยแหล่งจ่ายกระแสที่ออกแบบสามารถจ่ายกระแสได้ 22 พอร์ต ระดับนาโนแอมป์ 10 พอร์ต ดังนี้ 100nA, 200nA, 300nA, 400nA, 500nA, 600nA, 700nA, 800nA, 900nA และ 1000nA ในระดับไมโครแอมป์ 10 พอร์ต ดังนี้ 10μA, 20μA, 30μA, 40μA, 50μA, 100μA, 150μA, 200μA, 250μA และ 300μA ส่วนอีก 2 พอร์ตสามารถจ่ายกระแสแบบปรับค่าได้ในระดับไมโครแอมป์ตั้งแต่ 0-220μA. จากผลการทดสอบ สามารถจ่ายกระแสจากพอร์ตค่าคงที่ได้แม่นยำ ส่วนพอร์ตปรับค่าได้มีค่าผิดพลาดสูงสุดเพียง 7.2 %

คำสำคัญ: แหล่งจ่ายกระแส ไมโครคอนโทรลเลอร์ วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส

Abstract

This article presents a Nanoamp-level DC current power supply controllable via a microcontroller. It consists of 2-part which are V/I converters using AD844 and a control circuit. It is designed for practical use in electronic circuits that require a fixed rate and adjustable current source. In order to make the experiment more efficient, the designed current source can supply current 22 ports, 10 nanoamp level ports as follows: 100nA, 200nA, 300nA, 400nA, 500nA, 600nA, 700nA, 800nA, 900nA and 1000nA. The current fixed rate microamp 10 output ports consist of 10μA, 20μA, 30μA, 40μA, 50μA, 100μA, 150μA, 200μA, 250μA, and 300μA. The other two ports can supply adjustable current levels microamps from 0-220μA. From the results, the power supply gives the constant port accurately. The adjustable port has a maximum error of only 7.2%.

Keywords: Current supplier, Microcontroller, V/I Converter

1. บทนำ

ปัจจุบันการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ มุ่งเน้นให้วงจรมีขนาดกะทัดรัด ประหยัดพลังงาน และสามารถควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ [1-2] เพื่อตอบสนองการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งนักวิจัยและผู้ผลิตวงจรรวมได้สร้างอุปกรณ์สำเร็จรูปที่ทำให้สามารถควบคุมค่าพารามิเตอร์ได้ด้วยกระแสหรือแรงดัน เช่น วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองควบคุมได้ด้วยกระแส (Current Controlled Current Conveyor Second Generation ; CCCII) วงจรขยายความนำถ่ายโอน (Operational Transconductance Amplifier ; OTA) เป็นต้น ซึ่งโอทีเอนี้สามารถปรับค่าความนำได้ด้วยกระแสไบแอส ด้วยเหตุนี้โอทีเอจึงได้รับความนิยมในกลุ่มนักวิจัยและวิศวกร โดยนำไปประยุกต์และออกแบบเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์เป็นจำนวนมาก จากความนิยมดังกล่าวปัจจุบันโอทีเอนี้ไปสร้างเป็นวงจรรวมในเชิงพาณิชย์ เช่น CA3080, LT1228 และ LM13700 เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตาม การควบคุมค่าความนำของโอทีเอที่ควบคุมด้วยกระแสจึงมีความยุ่งยากเนื่องจากในห้องปฏิบัติการส่วนมากเป็นแหล่งจ่ายแรงดันเพียงอย่างเดียว จึงต้องมีการประยุกต์ทำการแปลงผันแรงดันให้กลายเป็นกระแส ก่อนจ่ายให้กับโอทีเออีกครั้ง

จากการศึกษาและค้นคว้าพบว่าแหล่งจ่ายกระแสที่พิกัดต่ำในเชิงพาณิชย์ แต่มีราคาสูง อีกทั้งการบำรุงรักษามีความยุ่งยาก นอกจากนี้ได้มีผู้นำเสนอแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า [3] แหล่งจ่ายนี้มีลักษณะเด่นให้แหล่งจ่ายกระแสที่ปรับค่าได้และแบบค่าคงที่ อีกทั้งสามารถให้ค่าที่มีความแม่นยำสูง แต่ยังมีข้อด้อยคือสามารถให้แหล่งจ่ายที่ปรับค่าได้เพียงหนึ่งช่อง อีกทั้งแบบค่าคงที่อีก 6 ช่อง ระดับไมโครแอมป์ ไม่สามารถให้จ่ายกระแสในระดับนาโนแอมป์ได้ จากที่กล่าวมาข้างต้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ออกแบบและสร้างแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่สามารถปรับค่าได้ระดับไมโครแอมป์จำนวนสองพอร์ต และแบบค่าคงที่จำนวน 20 พอร์ตในระดับนาโนแอมป์ ถึงระดับร้อยไมโครแอมป์

2. หลักการทำงานและการออกแบบ

2.1 การแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะล็อก

ในการติดต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับอุปกรณ์ไอซีภายนอก สัญญาณจากอุปกรณ์ภายนอกที่ทำการติดต่อดังนั้น

ส่วนใหญ่จะเป็นสัญญาณแอนะล็อกซึ่งจะไม่สามารถติดต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ได้โดยตรง เพื่อให้การทำงานและการติดต่อสื่อสารเป็นไปตามความต้องการจึงจำเป็นต้องมีชุดแปลงสัญญาณจากดิจิตอลเป็นแอนะล็อก (Digital to Analog Converter : DAC) เพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถติดต่อกับอุปกรณ์ไอซีภายนอกได้ ในงานวิจัยนี้ได้นำเอาไอซี DAC0808 มาต่อเป็นชุดแปลงสัญญาณจากดิจิตอลเป็นแอนะล็อกต่อเป็นชุดแปลงสัญญาณจากดิจิตอลเป็นแอนะล็อก [4]

2.2 วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส

วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสเป็นวงจรหลักของแหล่งจ่ายกระแสพิกัดต่ำควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์โดยวงจรนี้สร้างด้วยไอซีเบอร์ AD844 เพื่อทำหน้าที่ในส่วนของการแปลงแรงดันเป็นกระแส (V/I)

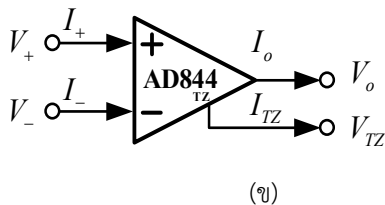
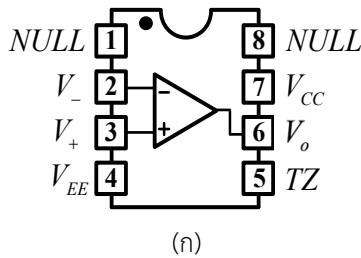
2.2.1 วงจรขยายป้อนกลับกระแส (CFA)

วงจรขยายป้อนกลับกระแสหรือวงจร CFA (Current Feedback Amplifier) ประกอบด้วยวงจรสายพานกระแส (Current Conveyor) ต่อร่วมอยู่กับวงจรตามแรงดัน (Voltage Follower) โดยที่วงจรสายพานกระแสเป็นอุปกรณ์แอคทีฟชนิดหนึ่งที่ทำงานในโหมดกระแสที่ได้รับความนิยม เนื่องจากเมื่อนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ แล้วทำให้เกิดการประมวลผลสัญญาณแอนะล็อกในรูปแบบต่าง ๆ ทั้งในโหมดกระแสและแรงดัน หลักการพื้นฐานของวงจรสายพานกระแส คือ การทำให้เกิดการส่งผ่านของกระแสระหว่างพอร์ตสองพอร์ตที่มีระดับค่าอิมพีแดนซ์ที่แตกต่างกันมาก ๆ กล่าวคือ อินพุตพอร์ตของวงจรมีอินพุตค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ ส่วนเอาต์พุตพอร์ตมีค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์สูง โดยมีค่าอัตราการส่งผ่านกระแสระหว่างสองพอร์ตเท่ากับหนึ่งในทางทฤษฎี [5]

2.2.2 ไอซีเบอร์ AD844

ไอซี AD844 [6] ผลิตโดยบริษัท Analog Devices มีโครงสร้างเป็นทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์มีคุณลักษณะเฉพาะ คือ มีแบนด์วิดท์กว้าง และตอบสนองความถี่ได้รวดเร็ว มีความคลาดเคลื่อนจากการทดลองต่ำ สัญญาณรบกวนต่ำ ทำงานร่วมกันในโหมดของกระแสตรงและกระแสสลับได้เป็นอย่างดี ไอซีเบอร์ AD844 ทำงานได้ตั้งแต่ $\pm 4.5V$ ถึง $\pm 18V$ มีลักษณะภายในเป็นวงจรขยายป้อนกลับกระแส หรือ CFA มีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและ

กระแสในแต่ละขาตั้งสมการที่ (1) ตำแหน่งขาและสัญลักษณ์ทางไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งมีพอร์ตอินพุตลบและอินพุตบวกอยู่ที่ขา 2 และ 3 ตามลำดับ ส่วนพอร์ตเอาต์พุตกระแสและแรงดันอยู่ที่ขา 5 และ 6 ตามลำดับ



รูปที่ 1 (ก) ตำแหน่งขา และ (ข) สัญลักษณ์ทางไฟฟ้าของไอซี AD844

$$\begin{bmatrix} I_+ \\ V_- \\ I_{TZ} \\ V_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_+ \\ I_- \\ V_{TZ} \\ I_o \end{bmatrix} \quad (1)$$

รูปที่เมื่อนำไอซีเบอร์ AD844 มาต่อร่วมกับตัวต้านทานดังรูปที่ 2 ทำให้สามารถสร้างเป็นวงจรแหล่งจ่ายกระแส โดยที่วงจรรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_{DC}) ส่งผลทำให้เกิดกระแสไหลผ่านตัวต้านทาน (R) จากความสัมพันธ์กระแสที่ขา 2 และขา 5 ในสมการที่ (1) จึงได้ว่ากระแสเอาต์พุตของวงจรแหล่งจ่ายกระแส (I_{out}) สามารถหาค่าได้ดังสมการที่ (2)

$$I_{out} = \frac{V_{DC}}{R} \quad (2)$$

2.2.3 การคำนวณค่าผิดพลาด

การวัดปริมาณที่ถูกต้องแม่นยำอาจไม่สามารถทำให้เกิดขึ้นได้ทั้งในงานทางด้านปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ และอุตสาหกรรมในการวัดจะเกิดข้อผิดพลาดขึ้นเสมอเพียงแต่อาจจะมีจำนวนมาก

หรือน้อยเท่านั้น ในการวัดทางไฟฟ้าก็เช่นเดียวกันไม่ว่าจะเป็นการวัดแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าและค่าความต้านทาน ฯลฯ ค่าที่วัดได้โดยใช้อุปกรณ์วัดดิจิทัลมัลติมิเตอร์รุ่น SANWA CD772 ไม่ได้เป็นค่าที่ถูกต้องเสมอไปค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นเรียกว่าค่าผิดพลาดสมบูรณ์ (Absolute Error) และค่าผิดพลาดสมบูรณ์เทียบกับค่าที่ถูกต้องเรียกว่าค่าผิดพลาดสัมพัทธ์ (Relative Error) [7] เมื่อค่าแรงดันที่วัดได้คือ V_m ค่าแรงดันที่ต้องการคือ

ค่าแรงดันผิดพลาดสมบูรณ์

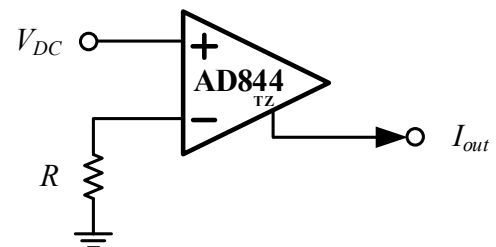
$$\Delta V = V - V_m \quad (3)$$

ค่าแรงดันผิดพลาดสัมพัทธ์

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{V - V_m}{V} \quad (4)$$

ค่าแรงดันผิดพลาดสัมพัทธ์ร้อยละ

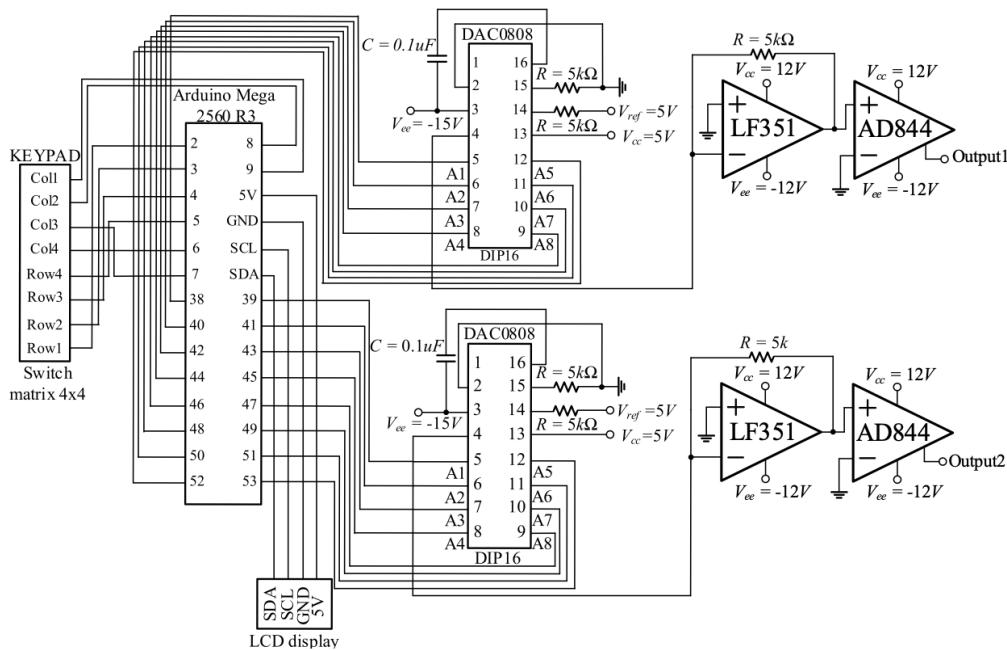
$$\text{ค่าแรงดันผิดพลาดสัมพัทธ์} = \frac{V - V_m}{V} \times 100\% \quad (5)$$



รูปที่ 2 วงจรแหล่งจ่ายกระแสด้วยไอซี AD844

2.3 การออกแบบแหล่งจ่ายกระแสฟิสิกส์ต่ำ

แหล่งจ่ายกระแสที่ควบคุมได้ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ออกแบบประกอบด้วย 2 ส่วนคือ แหล่งจ่ายกระแสค่าคงที่ และที่สามารถปรับค่าได้โดยส่วนที่ปรับค่าได้สามารถควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ (Arduino mega 2560 R3) ผ่านคีย์แพดในการกดคำสั่งเปลี่ยนค่าและพอร์ตของแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้ออกแบบวงจรโดยใช้ไอซีเบอร์ DAC0808 ทำหน้าที่แปลงสัญญาณจากดิจิทัลเป็นแอนะล็อกและขยายแรงดันโดยใช้ไอซีเบอร์ LF351 ซึ่งเป็นวงจรขยายแบบไม่กลับเฟสต่อเข้ากับไอซี



รูป 3 วงจรแหล่งกระแสแบบพอร์ตปรับค่าได้ที่ต่อร่วมกับชุดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์

เบอร์ AD844 ใช้ในการแปลงแรงดันเป็นกระแสเพื่อให้ได้ค่ากระแสตามที่กำหนดดังรูปที่ 3

2.3.1 การออกแบบแหล่งจ่ายกระแสพิกัดต่ำ

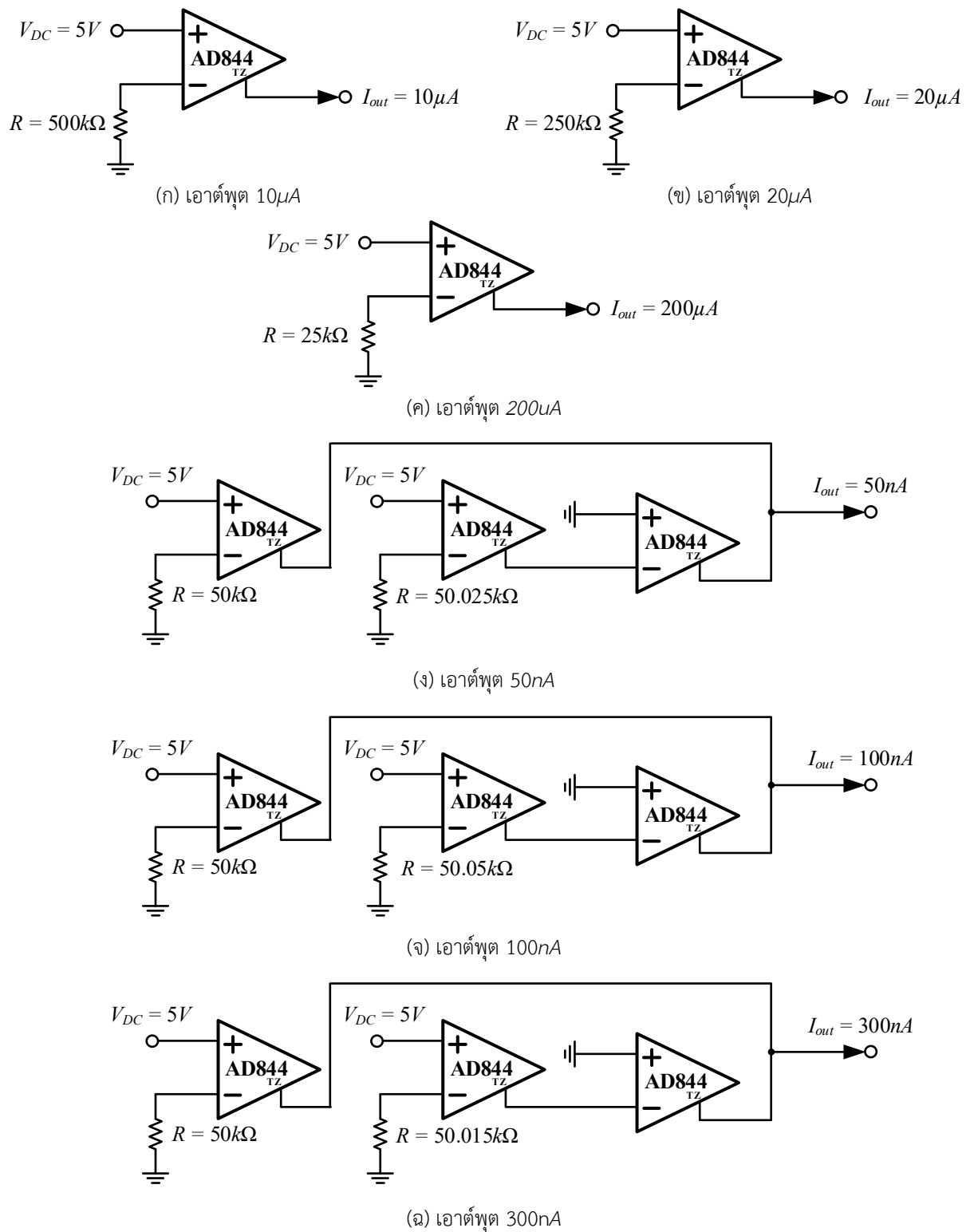
แหล่งจ่ายกระแสพิกัดต่ำควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ออกแบบประกอบด้วย 2 ส่วนคือ แหล่งจ่ายกระแสค่าคงที่ และที่สามารถปรับค่าได้โดยส่วนที่ปรับค่าได้สามารถควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ (Arduino mega 2560 R3) ผ่านคีย์แพดในการกดคำสั่งเปลี่ยนค่าและพอร์ตของแหล่งจ่ายกระแสไฟออกแบบวงจรโดยใช้ไอซีเบอร์ DAC0808 ทำหน้าที่แปลงสัญญาณจากดิจิตอลเป็นแอนะล็อกและขยายแรงดันโดยใช้ไอซีเบอร์ LF351 ซึ่งเป็นวงจรขยายแบบไม่กลับเฟสต่อเข้ากับไอซีเบอร์ AD844 ใช้ในการแปลงแรงดันเป็นกระแสเพื่อให้ได้ค่ากระแสตามที่กำหนดดังรูปที่ 3

ในรูปที่ 4 (ก)-(ค) แสดงตัวอย่างวงจรจากแหล่งจ่ายกระแสตรงระดับนาโนแอมป์พอร์ตเอาต์พุต $10\mu A$, $20\mu A$ และ $200\mu A$ ออกแบบโดยการคำนวณจากสมการที่ (2) จึงเลือกใช้ความต้านทานขนาด $500k\Omega$, $250k\Omega$ และ $25k\Omega$ ตามลำดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง $5V$ ส่วนพอร์ตเอาต์พุตระดับนาโนแอมป์ได้มีการปรับปรุงวงจร เนื่องจากวงจรในรูปที่ 2 สามารถให้กระแสต่ำสุดได้เพียงระดับไมโครแอมป์ เพราะฉะนั้นจึงทำการต่อ

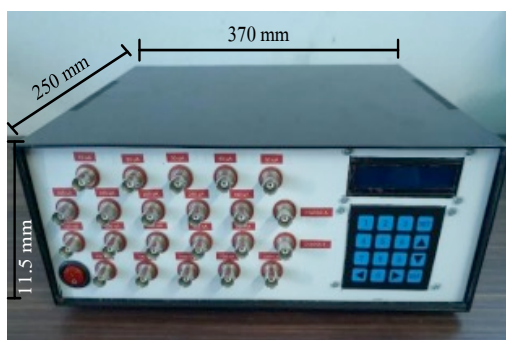
วงจรเพิ่มเติมเพื่อทำให้เกิดการหักล้างของกระแสแล้วได้เป็นเอาต์พุตระดับนาโนแอมป์ ซึ่งตัวอย่างวงจรแหล่งจ่ายกระแสพอร์ตเอาต์พุต $50nA$, $100nA$ และ $300nA$ แสดงดังรูปที่ 4 (ง)-(ฉ) ตามลำดับ พอร์ต $50nA$ ใช้ตัวต้านทาน $50.025k\Omega$ กับ $50k\Omega$ พอร์ต $100nA$ ใช้ตัวต้านทาน $50.05k\Omega$ กับ $50k\Omega$ และพอร์ต $300nA$ ใช้ตัวต้านทาน $50.15k\Omega$ กับ $50k\Omega$

2.4 โครงสร้างตัวเครื่อง

จากรูปที่ 5 (ก)-(ง) แสดงลักษณะภายนอกของแหล่งจ่ายกระแสตรงระดับนาโนแอมป์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ออกแบบ โดยมีขนาดตัวเครื่องเท่ากับ $370 \times 250 \times 11.5$ mm ซึ่งด้านหน้าตัวเครื่องในรูปที่ 5 (ก) จะประกอบไปด้วย จอแสดงผลแบบ LCD คีย์แพด และหัวเอาต์พุตจ่ายกระแส 22 พอร์ต โดย 2 พอร์ตสำหรับค่าปรับค่าได้ (ChA และ ChB) และ 20 พอร์ตเป็นพอร์ตคงค่า จากรูปที่ 5 (ข) แสดงตัวเครื่องด้านหลังออกแบบให้มีการใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับ $220V$ $50Hz$ มีสวิตช์ปิดเปิดเครื่อง และฟิวส์เพื่อความปลอดภัยของแหล่งจ่ายกระแส ในรูปที่ 5 (ค) และ (ง) แสดงลักษณะด้านข้างและด้านบนของตัวเครื่องซึ่งออกแบบให้มีลักษณะเป็นแผ่นเหล็กรอบคลุมวงจรภายใน ส่วนในรูปที่ 6 เป็นวงจรภายในตามที่ได้ออกแบบไว้ สำหรับจอ LCD ในรูปที่ 7 ใช้สำหรับแสดงค่าการปรับกระแสของพอร์ตปรับค่าได้



รูปที่ 4 วงจรแหล่งจ่ายกระแสแบบพอร์ตคงค่า



(ก) ด้านหน้า



(ข) ด้านข้าง

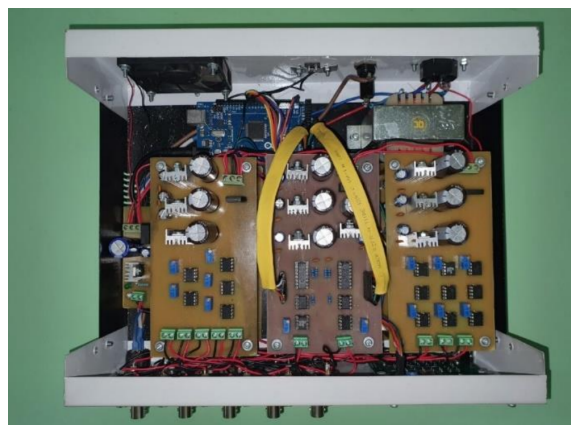


(ค) ด้านหลัง

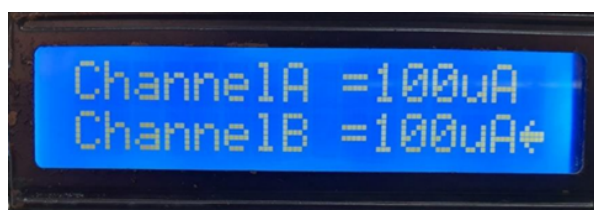


(ง) ด้านบน

รูปที่ 5 ลักษณะภายนอกของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 6 ลักษณะภายในของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 7 หน้าจอ LCD แสดงผลเมื่อเริ่มการทำงาน

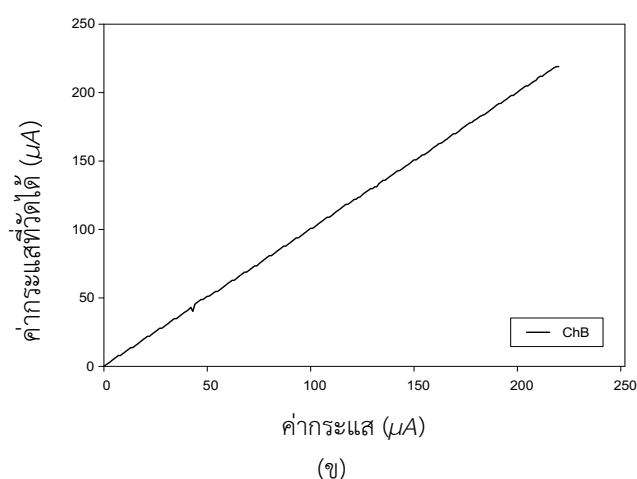
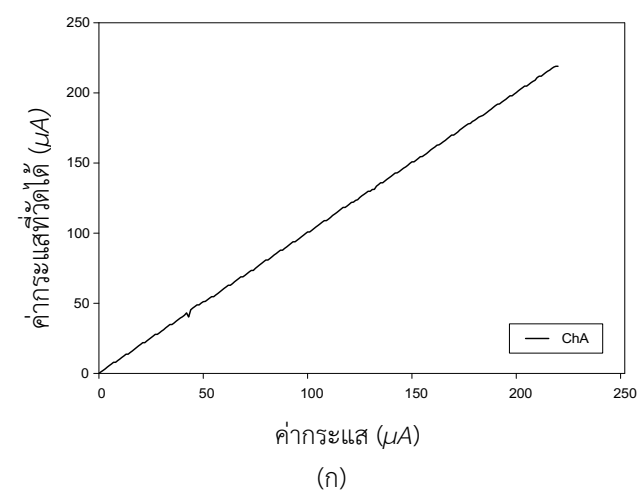
3. ผลการทดลอง

การทดสอบประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายกระแสตรงระดับนาโนแอมป์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ สำหรับพอร์ตปรับค่าได้ ทำการปรับค่าตั้งแต่ $0\mu A$ - $220\mu A$ โดยใช้ดิจิตอลมิเตอร์รุ่น SANWA CD772 ส่วนแบบพอร์ตจ่ายกระแสแบบคงค่าใช้การทดสอบในทำนองเดียวกัน ซึ่งพอร์ตที่มีพิกัดกระแสในระดับไมโครแอมป์ทำการวัดกระแสโดยใช้ฟังก์ชันวัดกระแสจากมัลติเตอร์

เนื่องด้วยในงานวิจัยมีพอร์ตที่ออกแบบในพิกัดกระแสระดับนาโนแอมป์ ซึ่งอุปกรณ์เครื่องมือวัดที่ใช้ไม่สามารถวัดค่าในพิกัดดังกล่าวได้ จึงได้ประยุกต์โดยใช้ตัวต้านทานต่อเป็นโหลดทางด้านเอาต์พุต จากนั้นใช้มัลติมิเตอร์วัดค่าแรงดันตกคร่อมโหลด สุดท้ายใช้กฎของโอห์มในการคำนวณจากแรงดันให้กลายเป็นกระแส จากผลการวัดพบว่าพอร์ตจ่ายกระแสแบบคงค่าสามารถให้ผลลัพธ์ได้ตรงตามที่ออกแบบไว้โดยมีค่าเป็นไปตามนี้ พอร์ตระดับไมโครแอมป์จำนวน 10 พอร์ต ดังนี้ $10\mu A$, $20\mu A$, $30\mu A$, $40\mu A$, $50\mu A$, $100\mu A$, $150\mu A$, $200\mu A$, $250\mu A$ และ $300\mu A$ และพอร์ตระดับนาโนแอมป์จำนวน 10 พอร์ต ดังนี้ $100nA$, $200nA$, $300nA$, $400nA$, $500nA$, $600nA$, $700nA$,

800nA, 900nA และ 1000nA ทั้งนี้จากพอร์ตแบบคงค่าทั้ง 20 พอร์ต ค่าที่วัดได้มีการเบี่ยงเบนไปจากค่าที่ได้จากทฤษฎีเพียงเล็กน้อย แต่ทางผู้วิจัยได้มีการปรับชดเชยค่ากระแสเอาต์พุต (ชดเชยโดยการปรับค่า R) จนกระทั่งมีค่าเท่ากับกระแสที่คำนวณไว้จึงส่งผลทำให้ค่าความผิดพลาดเป็น 0% ดังตารางที่ 1 และ 2

จากรูปที่ 8 แสดงผลค่าที่วัดได้ของ ChA และ ChB เปรียบเทียบกับค่ากระแสที่กำหนด โดยค่าความผิดพลาดสูงสุดของ ChA คือ $\pm 7.2\%$ และที่ ChB คือ $\pm 7.2\%$ ค่าความผิดพลาดต่ำสุดของ ChA คือ $\pm 0.15\%$ และที่ ChB คือ $\pm 0.15\%$



รูปที่ 8 ค่ากระแสที่วัดได้ของ (ก) ChA และ (ข) ChB

ตารางที่ 1 กระแสที่วัดจากพอร์ตแบบค่าคงที่ระดับไมโครแอมป์

ค่ากระแส (μA)	ค่าที่วัดได้ (μA)	ค่าผิดพลาด (%)
10	10	0
20	20	0
30	30	0
40	40	0
50	50	0
100	100	0
150	150	0
200	200	0
250	250	0
300	300	0

ตารางที่ 2 กระแสที่วัดจากพอร์ตแบบค่าคงที่ระดับนาโนแอมป์

ค่ากระแส (nA)	ค่าที่วัดได้ (nA)	ค่าผิดพลาด(%)
100	100	0
200	200	0
300	300	0
400	400	0
500	500	0
600	600	0
700	700	0
800	800	0
900	900	0
1000	1000	0

4. สรุป

งานวิจัยได้นำเสนอแหล่งจ่ายกระแสตรงระดับนาโนแอมป์ ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์โดยใช้วงจรแปลงค่าแรงดันเป็น กระแสที่สร้างจากไอซีเบอร์ AD844 สามารถเปลี่ยนพอร์ตจ่าย กระแสได้โดยการกดคำสั่งผ่านคีย์แพด โดยออกแบบให้มีการจ่าย กระแสแบบปรับค่าได้ตั้งแต่ $0\mu A$ - $220\mu A$ จำนวน 2 พอร์ต ซึ่งมี ค่าความผิดพลาดสูงสุดเพียง $\pm 7.2\%$ และค่าความผิดพลาดต่ำสุด

เท่ากับ $\pm 0.15\%$ ส่วนแบบคงค่าจำนวน 20 พอร์ต แบ่งออกเป็นระดับนาโนแอมป์จำนวน 10 พอร์ต ดังนี้ $100nA$, $200nA$, $300nA$, $400nA$, $500nA$, $600nA$, $700nA$, $800nA$, $900nA$ และ $1000nA$ และในระดับไมโครแอมป์จำนวน 10 พอร์ต ดังนี้ $10\mu A$, $20\mu A$, $30\mu A$, $40\mu A$, $50\mu A$, $100\mu A$, $150\mu A$, $200\mu A$, $250\mu A$ และ $300\mu A$ จากการทดสอบทุกพอร์ตแบบค่าคงที่ได้ผลลัพธ์ตามที่คาดการณ์ไว้เป็นอย่างดี

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Jaikla, F. Khateb, T. Kulej, and K. Pitaksuttayaprot, "Universal Filter Based on Compact CMOS Structure of VDDA," *Sensors*, vol. 21, p. 1683, 2021.
- [2] W. Jaikla, S. Siripongdee, F. Khateb, R. Sotner, P. Silapan, P. Suwanjan, et al., "Synthesis of biquad filters using two VD-DIBAs with independent control of quality factor and natural frequency," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 132, p. 153601, 2021.

- [3] ธนภัทร กรับทอง, ประชา แซ่โซ้ง, รัชตะ พิริยะกิจสกุล, อภิวัฒน์ ต้นทอง และภมร ศิลาพันธ์, "แหล่งจ่ายกระแสพิกดต่ำควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์," การประชุมวิชาการงานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 12. ม.ราชภัฏนครสวรรค์ ไทย. 26 พฤษภาคม 2563 - 27 พฤษภาคม 2563. หน้า 407-411.
- [4] Texas Instruments, ADC080x 8-Bit, μP -Compatible, Analog-to-Digital Converters ,Available online: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/adc0804-n.pdf> (revised on May 2015). <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/adc0804-n.pdf> (revised on May 2015).
- [5] "บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ : วงจรซีเอฟโอเอ," ปริญญานิพนธ์, มหาวิทยาลัยสยาม, Available online: https://www.research-system.siam.edu/images/EE/ProjectEE2/wip/07_ch2.pdf.
- [6] Analog Devices, AD844: 60 MHz, 2000 V/ μs ,Monolithic Op Amp with Quad Low Noise, Available online: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD844.pdf> (revised on May 2017).
- [7] มนต์รี ศิริปรัชญานนท์ "Power Supply Design," ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.