บรรณาธิการปริทัศน์/Editorial Corner

แนวโน้มของการออกแบบวงจรแอนะล็อก: ปัจจุบันและอนาคต
Trends in Analog Circuit Design: Present and Future

มนตรี ศิริปรัชญานันท์
ศูนย์วิจัยการออกแบบวงจรรวม ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

Montree Siripruchyanun
Integrated Circuit Design Research Center, Department of Teacher Training in Electrical Engineering, Faculty of Technical Education, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

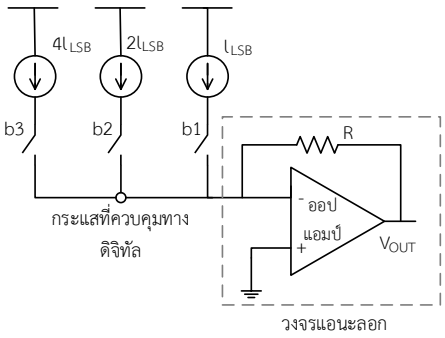
*Corresponding Author, E–mail: montree.s@fte.kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.09.002
© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

วงจรอิเล็กทรอนิกส์มีบทบาทในการใช้งานในชีวิตประจำวันของมนุษย์มากขึ้นในปัจจุบัน ไม่ว่าจะในเครื่องใช้ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ ระบบควบคุมในงานอุตสาหกรรม ระบบยานยนต์ เป็นต้น โดยทั่วไปวงจรอิเล็กทรอนิกส์สามารถจำแนกได้ออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ วงจรแอนะล็อกและวงจรดิจิทัล วงจรแอนะล็อกมีความสำคัญมากในโลกแห่งความเป็นจริง เนื่องจากสัญญาณแอนะล็อกนั้นเป็นสัญญาณที่อยู่รอบตัวมนุษย์ ไม่ว่าจะเป็นสัญญาณเสียง สัญญาณภาพ คลื่นวิทยุ และอื่นๆ เป็นสัญญาณที่มีความต่อเนื่องในด้านของค่าสัญญาณต่อเวลา ซึ่งเป็นนิยามของสัญญาณแอนะล็อก ส่วนการประมวลผลสัญญาณส่วนใหญ่จะกระทำในแบบดิจิทัลด้วยตัวประมวลผลสัญญาณความเร็วสูง การแปลงสัญญาณในโลกแห่งความเป็นจริง (Real-world Signals) เช่น สัญญาณเสียงไปเป็นสัญญาณดิจิทัลก่อนที่จะมีการประมวลผลยังจำเป็นที่ต้องใช้วงจรแอนะล็อก เช่น วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (Analog to Digital Convertor; ADC) ดังนั้นความสนใจในการออกแบบวงจรแอนะล็อกยังได้รับการพัฒนาไปอย่างกว้างขวาง เนื่องด้วยผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์จำเป็นต้องใช้กำลังไฟฟ้าในการทำงาน วงจรแอนะล็อกสมัยใหม่จึงมีการเน้นพิจารณาเรื่องของการจัดการกำลังไฟฟ้า (Power Management) [1] เนื่องจากในปัจจุบันผลิตภัณฑ์ทางอิเล็กทรอนิกส์จะมุ่งเน้นให้มีขนาดเล็กสามารถพกพาได้ง่าย จึงต้องทำงานโดยมีแบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ในบทบรรณาธิการปริทัศน์นี้จึงขอนำเสนอแนวโน้ม และแนวทางในการออกแบบวงจรแอนะล็อกในปัจจุบันและต่อเนื่องถึงอนาคตอันใกล้นี้

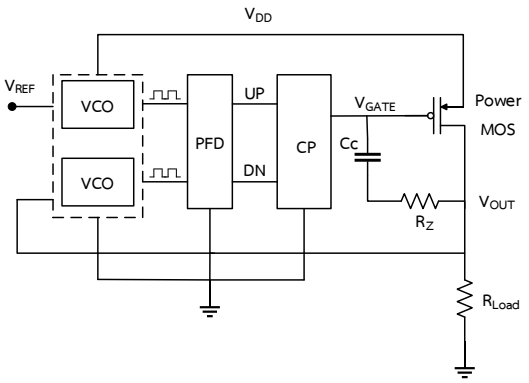
1. การใช้ดิจิทัลลอจิกเพื่อเพิ่มสมรรถนะของวงจรแอนะล็อก

โดยทั่วไปวงจรแอนะล็อกมักจะถูกออกแบบด้วยวิธีการที่นักออกแบบจะตัดสินใจเลือกใช้ค่ากระแสไบแอส และอุปกรณ์ก่อนไม่ว่าจะเป็นตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และตัวอื่นๆ ก่อนการผลิตจริง ซึ่งจะทำให้วงจรแอนะล็อกนั้นมีความเสถียรและพร้อมที่จะรองรับสัญญาณในโลกแห่งความเป็นจริง แต่กระนั้นในขณะที่การใช้งานจริง นักออกแบบวงจรมักจะเผชิญกับปัญหาด้านการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมภายนอก เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ค่าแรงดันขีดเริ่มทำงานของทรานซิสเตอร์ การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟเลี้ยงจาก

การอ้างอิงบทความ: มนตรี ศิริปรัชญานันท์, "แนวโน้มของการออกแบบวงจรแอนะล็อก: ปัจจุบันและอนาคตเรื่อง," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 32, ฉบับที่ 1, หน้า 1–4, ม.ค.–มี.ค. 2565.



รูปที่ 1 ตัวอย่างการใช้วงจร DAC แบบกระแสขนาด 3 บิต เพื่อสร้างกระแสที่ควบคุมทางดิจิทัลป้อนเข้าวงจรแอนะล็อก



รูปที่ 2 วงจรรักษาระดับแรงดันที่อาศัยความถี่ ซึ่งมีการแทนออปแอมป์ด้วยภาคกำเนิดสัญญาณ

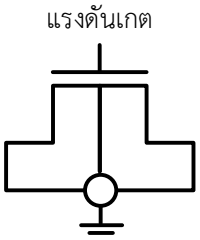
แบตเตอรี่ และปัจจัยอื่นๆ อีกมากมาย นักออกแบบวงจรจึงมีความพยายามที่จะค้นหาวิธีการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุด การควบคุมค่าต่างๆ ทางดิจิทัล (Digital Controlled) ไม่ว่าจะเป็นการควบคุมค่ากระแสไบแอส ความต้านทาน ค่าความจุไฟฟ้า หรือค่าอื่นๆ เพื่อจะทำให้สามารถควบคุมค่านั้นๆ ได้โดยใช้ไมโครโพรเซสเซอร์ภายนอกเพื่อชดเชยการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งกระบวนการนี้จะเป็นการทำให้สามารถสอบเทียบภายนอก (External Calibration) ระบบที่ต้องการความแม่นยำสูงได้ [2]

ในการสร้างการควบคุมค่าทางดิจิทัลนี้ วงจร DAC จะถูกใช้เพื่อควบคุมจากภายนอก ดังในรูปที่ 1 วงจร DAC แบบกระแสจะใช้ในการควบคุมกระแสในวงจรแอนะล็อก โดยค่ากระแสที่มีการควบคุมทางดิจิทัลนี้จะถูกทวีคูณด้วยค่าตัวต้านทานคงที่ ซึ่งหมายความว่า ระบบที่กล่าวถึงสามารถเป็นการควบคุมแรงดันทางดิจิทัลได้ด้วย

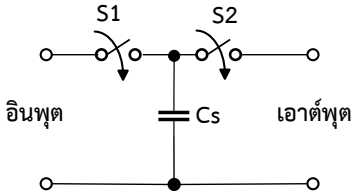
2. การใช้วงจรที่อาศัยความถี่ในการออกแบบวงจรแอนะล็อก

วงจรขยายสัญญาณถือได้ว่าเป็นวงจรพื้นฐานของวงจรแอนะล็อก ซึ่งเป็นวงจรเชิงเส้นที่สามารถขยายสัญญาณขนาดเล็กให้ใหญ่ขึ้นได้ ความแม่นยำของการขยายสัญญาณใดๆ นั้น ขึ้นอยู่กับอัตราขยายลูปเปิด (Open-loop Gain) เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่า ยิ่งอัตราขยายลูปเปิดมีค่าสูง ความแม่นยำของวงจรขยายก็จะมีค่ามากขึ้น แต่ก็จะนำมาซึ่งการบริโภคกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้น การประยุกต์ใช้ความถี่สามารถนำมาซึ่งอัตราขยายไฟตรงที่มีค่าเป็นอนันต์ และไม่มีค่าความคลาดเคลื่อนของอัตราขยายในวงจรขยายสัญญาณที่กำลังไฟฟ้าต่ำได้ วงจรกำเนิดสัญญาณที่ควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage Controlled Oscillator; VCO) และเฟสล็อกลูป (Phase Locked Loop; PLL) สามารถนำมาใช้ในการออกแบบวงจรรักษาระดับแรงดันที่มีความแม่นยำสูง ดังแสดงในรูปที่ 2 ได้ ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่า สามารถแทนออปแอมป์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ควบคุมที่ใช้ในวงจรรักษาระดับแรงดันทั่วไปด้วยวงจร VCO โดยให้ผลดี คือ วงจรมีอัตราบริโภคกำลังไฟฟ้าต่ำ (3.7 μW) มีแรงดันร่วงหล่น (Dropout Voltage) ต่ำ (0.1 โวลต์) และมีประสิทธิภาพสูงกว่า 90% ที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟเลี้ยงเพียง 0.8 โวลต์

จากรูปที่ 2 เห็นได้ว่า มีการออกแบบวงจรใหม่โดยใช้ส่วนที่ทำงานที่ความถี่สูงเข้ามาร่วม ซึ่งจะทำให้ระบบมีความเสถียรขึ้น โดย VCO จะเปลี่ยนแรงดันป้อนกลับและแรงดันอ้างอิงให้เป็นความถี่ ความถี่นั้นจะถูกเปรียบเทียบกับวงจรตรวจจับเฟส-ความถี่ (Phase Frequency Detector; PFD) แล้วแปลงกลับไปเป็นแรงดันโดยภาคสูบประจุ (Charge Pump; CP)



รูปที่ 3 ตัวเก็บประจุที่สร้างจากมอสทรานซิสเตอร์ภายในวงจรรวมเพื่อหลีกเลี่ยงการใช้อุปกรณ์บนแผ่นวงจรพิมพ์



รูปที่ 4 ความถี่ของวงจรสวิตช์-ตัวเก็บประจุ หรือต่อมาคือค่าความต้านทานของวงจร สามารถควบคุมได้จากแบบจำลองเรียนรู้ของเครื่องตามที่ต้องการได้

3. การใช้เทคนิคออกแบบวงจรโดยหลีกเลี่ยงอุปกรณ์บนแผ่นวงจรพิมพ์

เป็นที่ทราบกันดีว่า การสร้างวงจรในแผ่นวงจรพิมพ์มีราคาสูง ดังนั้นนักออกแบบวงจรจึงมีความพยายามพัฒนาวงจรต่างๆ จากลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ไปอยู่ในวงจรรวมหรือไอซีแทน เพื่อประหยัดราคาของอุปกรณ์ในแผ่นวงจรพิมพ์ในช่วงการผลิตจำนวนมาก (Mass Product) ยกตัวอย่างวงจรรักษาระดับแรงดันจะมีการใช้ตัวเก็บประจุอยู่ในย่าน 1–10 ไมโครฟารัดที่ภาคเอาต์พุต จึงทำให้เกิดความต้องการที่จะนำตัวเก็บประจุค่านี้ไปอยู่ในตัววงจรรวม โดยสามารถทำได้โดยใช้ตัวเก็บประจุในมอสทรานซิสเตอร์ ดังรูปที่ 3 (ซึ่งมีค่าไม่ได้เที่ยงตรงมากแต่จะใช้พื้นที่น้อยกว่า) หรือตัวเก็บประจุแบบ MIM (Metal Insulator Metal) (มีค่าเที่ยงตรงกว่าแต่จะใช้พื้นที่มากกว่า) เทคนิคการออกแบบวงจรแบบนี้สร้างความท้าทายในกระบวนการออกแบบ เนื่องมาจากความซับซ้อนในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ แต่ก็จะให้ผลคุ้มค่าในเรื่องของความประหยัดในกระบวนการผลิต

4. การใช้อัลกอริทึมอัจฉริยะและการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) เพื่อควบคุมตัวแปรในวงจร เช่น แบนด์วิดท์ อัตราสลูว์

ในประเด็นที่ 1 ที่ได้วิเคราะห์ก่อนหน้านี้ซึ่งเป็นการใช้การควบคุมทางดิจิทัลมาควบคุมกระแสไบแอส ความต้านทาน และตัวเก็บประจุเพื่อให้ค่าเหล่านั้นสามารถถูกควบคุมจากภายนอกโดยใช้ไมโครโพรเซสเซอร์อันเป็นการชดเชยผลจากการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป อาทิ ระดับกำลังไฟฟ้า อุณหภูมิ การผันแปรจากกระบวนการผลิตวงจร และอื่นๆ ระดับถัดมา คือ กระบวนการฝึกให้ไมโครโพรเซสเซอร์ นั้น สามารถตัดสินใจค่าเหล่านั้น อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมที่ได้กล่าวไปด้วยตัวมันเอง ซึ่งสามารถสร้างแบบจำลองในการฝึกนั้นด้วยชุดข้อมูลของค่ากระแสไบแอส ความต้านทาน และตัวเก็บประจุที่ต้องการให้วงจรแอนะล็อกนั้นเป็นค่าเท่าใดจากปัจจัยสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน แบบจำลองนี้สามารถทำงานได้จากไมโครโพรเซสเซอร์เพื่อไปควบคุมสัญญาณ PWM ของวงจรสวิตช์-ตัวเก็บประจุ [3] หรือไปควบคุมความถี่ของภาคกำเนิดสัญญาณซึ่งสามารถนำไปควบคุมตัวแปรทางแอนะล็อก เช่น แบนด์วิดท์ อัตราสลูว์ และอัตราการบริโภคกำลังไฟฟ้าได้

5. การลดขนาดวงจรแอนะล็อก

เมื่อเร็วๆ นี้มีรายงานยืนยันว่า ทรานซิสเตอร์จะไม่สามารถลดขนาดต่อไปได้อีก [4] อย่างไรก็ตาม การกำเนิดของทรานซิสเตอร์ 3 มิติ เช่น FinFET และ GAA (Gate-All-Around) FET [5] จะยังคงรักษากฎของมัวร์ (Moore's Law) (กฎของมัวร์ระบุว่า จำนวนของทรานซิสเตอร์ในพื้นที่ของวงจรรวมจะเพิ่มขึ้นสองเท่าทุกๆ ประมาณสองปี) อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีของทรานซิสเตอร์ที่มีขนาดต่ำกว่า 100 นาโนเมตร นั้น มีความท้าทายต่อการออกแบบวงจรแอนะล็อก เนื่องมาจากผลของอันดับสอง (Second Order Effects) ในเชิงการออกแบบ จะไม่มีความสัมพันธ์กำลังสองระหว่างกระแส-แรงดัน (I เทียบกับ Vgs) หรือกฎกำลังสองการใช้กระบวนการเทคโนโลยี gm/Id [6], [7] จึงได้รับความ

นิยมเป็นอย่างสูง เพราะมีความน่าเชื่อถือต่อการวิเคราะห์สมรรถนะของวงจรมากกว่าการใช้กฎกำลังสอง

โดยสรุป เทคโนโลยีด้านการออกแบบวงจรถือว่า มีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็ว ปัจจุบันยังมีผู้นำเสนอเทคนิคหรือเทคโนโลยีใหม่ๆ อย่างต่อเนื่อง เช่น มีทรานซิสเตอร์ชนิดใหม่ๆ ที่สามารถทำงานที่ความถี่สูงขึ้น บริโภคกำลังไฟฟ้าต่ำลง การออกแบบวงจรโดยใช้อันดับเศษส่วน (Fractional-order) ตลอดจนการออกแบบวงจรโดยไม่ใช้อุปกรณ์แพสซิฟเลย จึงจำเป็นที่นักวิจัยและออกแบบวงจรจะต้องติดตามอย่างต่อเนื่อง

เอกสารอ้างอิง

[1] S. Gupta. (2017). *Analog Circuit Design in 2018 and Beyond*. [Online]. Available: https://octopart.com/blog/archives/2017/12/analog-circuit-design-2018-beyond

[2] F. Chen, Y. Lu, and P. K. T. Mok, "A fast-transient 500-mA digitally assisted analog LDO with 30-μV/mA load regulation and 0.0073-ps FoM in 65-nm CMOS," in *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 56, no. 2, pp. 511–520, 2021.

[3] Wikipedia. (2020). *Switched Capacitor*. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Switched_capacitor

[4] S. Anthony. (2016). *Transistor will stop shrinking in 2021, but Moore's law will live on*. [Online]. Available: https://arstechnica.com/gadgets/2016/07/itrs-roadmap-2021-moores-law/

[5] Wikipedia. (2021). *Multigate Device*. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Multigate_device

[6] A. A. Youssef, B. Murmann, and H. Omran, "Analog IC design using precomputed lookup tables: Challenges and solutions," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 134640-134652, 2020.

[7] Z. Zhao and L. Zhang, "An automated topology synthesis framework for analog integrated circuits," in *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, vol. 39, no. 12, pp. 4325–4337, 2020.

รองศาสตราจารย์ ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์
รองหัวหน้ากองบรรณาธิการ