

## รายการอ้างอิง

1. International Electrotechnical Commission. IEC 687; Alternating current static watt-hour meters for active energy (classes 0.2 s and 0.5 s). 1992.
2. Vladimir Matic, Verica Marinkovic-Nedelicki, Vladimir Tadic. Comparison of Digital Signal Processing Methods for Sine Wave Signal Generation. Telecommunications Symposium, ITS '98 Proceedings. SBT/IEEE International Vol.1 (August 1998): 290-295.
3. โคทม อารียา. อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 2. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2544
4. Andrew Gubisch, Paul L. Lualdi Jr., Petar N. Miljanic, and James L. West. Power Calibrator Using Sampled Feedback for Current and Voltage. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement. 46, 2 (April 1997): 403-407.
5. Peter Zajec and Janez Nastran. Power Calibrator Using Switched Mode Voltage Source. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 49,. 4 (August 2000): 790-794.
6. Texas Instruments Incorporation. 16-Bit Digital-to-Analog Converter with Serial Data Interface[Online]. Available from: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/dac714.pdf> [2003,June 01]
7. Texas Instruments Incorporation. Op Amps for Everyone ;Design Reference[Online]. Available from: <http://focus.ti.com/lit/an/slod006b/slod006b.pdf> [2003,June 01]
8. Katsuhiko Ogata. Modern Control Engineering. United States of America: Prentice-Hall, 1997.
9. Stephen J. Chapman. Electric Machinery Fundamental. Singapore: McGraw-Hill Companies, 1999.
10. Texas Instruments Incorporation. High-Voltage, High-Current Operational Amplifier[Online]. Available from: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/opa544.pdf> [2002,August 05]
11. Taehwatrans Co., LTD. Supreme Accuracy Current Transformers ;Burden Vs. Output Voltage[Online]. Available from: [http://www.taehwatrans.com/pdf/taehwa\\_2.pdf](http://www.taehwatrans.com/pdf/taehwa_2.pdf) [2002,Jan 15]

12. Agilent Technologies Incorporation. 35670A Dynamic Signal Analyzer; Technical Specifications[Online]. Available from: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5966-3064E.pdf> [2003,Dec 10]



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เป็นบทความทางวิชาการ



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# การพัฒนาเครื่องจ่ายกำลังกระแสสลับสำหรับทดสอบมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าชนิดเฟสเดียว Development of an AC Power Source for Testing Single Phase Electrical Energy Meters

สราวุธ เมธาวิ และ เอกชัย ลีลารัมย์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทรศัพท์ 0-2218-6537 ต่อ 27 E-mail: bg\_entertainment@hotmail.com

## บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงการออกแบบวงจรสร้างสัญญาณแรงดันและกระแสรูปไซน์ที่มีความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกต่ำซึ่งสามารถปรับขนาด, เฟส และความถี่ของสัญญาณที่สร้างได้ โดยสัญญาณดังกล่าวจะถูกนำไปใช้เพื่อทดสอบมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า วงจรที่ออกแบบประกอบไปด้วยส่วนสร้างสัญญาณที่มีไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานร่วมกับตัวแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อกขนาด 16 บิตสองตัว และส่วนขยายสัญญาณที่ประกอบด้วยออปแอมป์และหม้อแปลงไฟฟ้า การต่อวงจรแบบป้อนกลับที่ส่วนขยายสัญญาณทำให้เราสามารถรับประกันคุณภาพของสัญญาณออกกว่าดีเพียงพอที่จะนำไปใช้ทดสอบมิเตอร์ได้ โดยไม่จำเป็นต้องวัดสัญญาณออกกลับไปประมวลผลอีก วงจรที่ออกแบบสามารถจ่ายแรงดันได้ในช่วง 200-250 V<sub>rms</sub> และ กระแส 0.05-30 A<sub>rms</sub> โดยมีความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกและความผิดพลาดต่ำ

คำสำคัญ: แหล่งจ่ายกำลัง, การทดสอบมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า

## Abstract

This article describes a design of circuits that can generate sinusoidal voltage and current signals with low harmonic distortion for testing single phase electrical energy meters. The amplitude, phase and frequency of the signals are adjustable. The circuits consist of two parts. The first part is a signal generator part using a microcontroller and two 16-bit digital to analog converters (DACs). The second part contains operational amplifiers (Op-Amps) and power transformers. With feedback topology, the output signal can be guaranteed to be good enough for testing electrical energy meters without measuring the output back for more processing. The designed circuits can generate voltage signal in range of 200-250 V<sub>rms</sub> and current signal in range of 0.05-30 A<sub>rms</sub> with low harmonic distortion and amplitude errors.

Keywords: power source, electrical energy meter testing

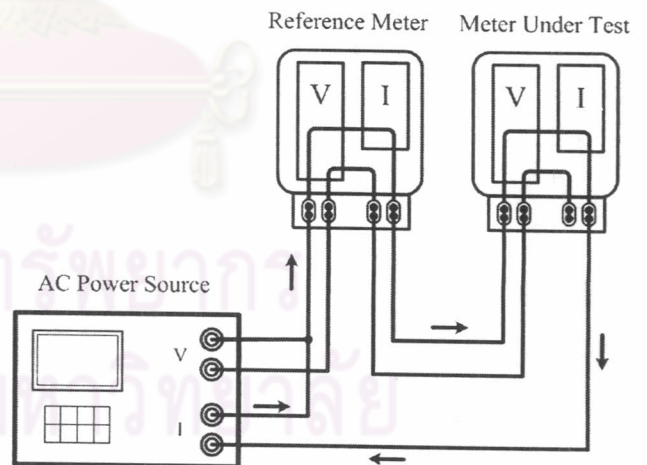
## 1. บทนำ

มิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์วัดปริมาณการใช้ไฟของผู้ใช้เพื่อที่จะนำมาคิดค่าบริการ มิเตอร์ทุกตัวที่จะนำมาใช้งานนั้นจะต้อง

ถูกทดสอบในหลาย ๆ ด้าน เพื่อยืนยันว่ามีสมบัติผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไว้หรือไม่ อุปกรณ์สำคัญในการทดสอบมิเตอร์ก็คือ อุปกรณ์จ่ายพลังงานซึ่งสามารถจ่ายสัญญาณสำหรับทดสอบมิเตอร์ตามที่มาตรฐานระบุได้ [1] ในปัจจุบันอุปกรณ์ดังกล่าวยังไม่มีการพัฒนาในประเทศ ต้องถูกนำเข้าจากต่างประเทศเพื่อใช้งาน รวมทั้งมีราคาสูง บทความนี้จึงนำเสนอแนวทางการออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์ดังกล่าว ส่วนประกอบและหลักการที่ใช้ รวมไปถึงผลการทดลองสร้างจริง

มิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าชนิดเฟสเดียวที่มีใช้ในประเทศไทยทำงานที่แรงดันพิกัด 220 V<sub>rms</sub> (คลาดเคลื่อนได้  $\pm 10\%$ ) ส่วนกระแสพิกัดจะมีหลายค่าขึ้นกับขนาดของโหลดในการใช้งาน เช่น 5/15 A<sub>rms</sub> (ตัวเลขตัวแรกเป็นค่ากระแสพิกัดและตัวเลขตัวหลังเป็นค่ากระแสสูงสุดที่มิเตอร์ยอมรับได้) เป็นต้น

การทดสอบที่สำคัญสำหรับมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าคือการทดสอบความแม่นยำในการวัด ซึ่งเป็นประเด็นหลักสำหรับการออกแบบสร้างมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า ระบบทดสอบเป็นดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ระบบทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า

โครงสร้างภายในของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าประกอบไปด้วยวงจรวัดค่าสองส่วนคือ ส่วนวัดค่าแรงดันและส่วนวัดค่ากระแส โดยมิเตอร์จะนำค่าแรงดันและกระแสที่ได้ไปคำนวณเป็นค่าพลังงานไฟฟ้า เราสามารถจ่ายแรงดันและกระแสในการทดสอบโดยใช้วิธีดังรูปที่ 1 ได้ สิ่งที่มีเตอร์มองเห็นคือ แรงดันจากแหล่งจ่ายแรงดันและกระแสจากแหล่ง

จ่ายกระแส ดังนั้นเราสามารถลดกำลังที่แหล่งจ่ายต้องใช้โดยการจ่ายแรงดันที่ค่ากระแสต่ำ ให้กับวงจรส่วนวัดแรงดันของมิเตอร์ และจ่ายกระแสที่ค่าแรงดันต่ำให้กระแสไหลผ่านส่วนวัดกระแสของมิเตอร์ได้ โดยทิศทางการไหลของกระแสเป็นดังรูป นอกจากนี้เรายังสามารถจำลองค่าโหลดที่ต้องการได้โดยการปรับขนาดแรงดันและกระแส และสามารถจำลองค่าตัวประกอบกำลัง (Power factor) ของโหลดได้โดยการปรับความต่างเฟสระหว่างสัญญาณทั้งสองอีกด้วย ผลที่ได้คือ เราสามารถจำลองโหลดที่ค่ากระแสสูง ๆ ให้กับมิเตอร์ได้โดยแหล่งจ่ายสัญญาณจ่ายกำลังต่ำ

ในการทดสอบความแม่นยำ เครื่องจ่ายกำลังทำหน้าที่สร้างสัญญาณแรงดัน และกระแสจ่ายให้กับมิเตอร์ที่ถูกวัดและมิเตอร์อ้างอิงที่มีความแม่นยำ แล้วจึงหาความแม่นยำของมิเตอร์ที่ถูกวัดเทียบกับมิเตอร์อ้างอิง ซึ่งมาตรฐาน IEC687 [1] ได้ระบุลักษณะสัญญาณแรงดันและกระแสที่จ่ายไว้ดังนี้

- 1) สัญญาณแรงดันที่แหล่งจ่ายสร้างเพื่อทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์ต้องมีขนาดคงที่ คลาดเคลื่อนไม่เกิน  $\pm 1\%$
- 2) ความถี่ของสัญญาณที่สร้างมีความคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน  $\pm 0.3\%$
- 3) สัญญาณแรงดันและกระแสที่จ่ายต้องเป็นสัญญาณรูปไซน์ที่มีความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกไม่เกิน  $2\%$

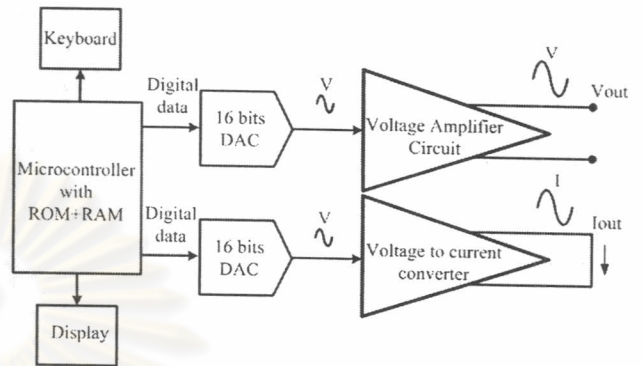
นอกจากนี้ มาตรฐานดังกล่าวยังได้ระบุว่า มิเตอร์แต่ละตัวต้องกินพลังงานไม่เกิน 2 วัตต์ ดังนั้นอุปกรณ์จ่ายพลังงานจึงต้องมีสมบัติดังนี้

- 1) ปรับขนาด เฟส และความถี่ของสัญญาณที่จ่ายได้ทุกค่าสำหรับการทดสอบ ( ขนาดแรงดันเป็น  $220 \pm 10\%$  และขนาดกระแสเป็น  $1\%$  ของค่าที่คิดไปจนถึงค่ากระแสสูงสุด )
- 2) สัญญาณที่จ่ายต้องมีความแม่นยำและมีความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกต่ำ
- 3) สัญญาณแรงดันที่จ่ายมีกำลังเพียงพอสำหรับจ่ายวงจรวัดแรงดันของมิเตอร์ และสัญญาณกระแสที่จ่ายต้องมีกำลังเพียงพอสำหรับสร้างกระแสผ่าน โหลดของวงจรซึ่งเป็นวงจรวัดกระแสและสายไฟนำสัญญาณ

## 2. โครงสร้างของเครื่องจ่ายกำลัง

เราสามารถออกแบบ โครงสร้างของเครื่องจ่ายกำลังได้หลายแบบ โดยอาจจะเป็นการใช้หลักการของวงจรจ่ายกำลังแบบสวิดช์ ( Switch Mode Power Supply ) ร่วมกับกลวิธีการควบคุมสัญญาณ ดังเช่นในบทความ [2] หรือจะใช้หลักการสร้างสัญญาณโดยตัวแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อกสร้างสัญญาณต้นแบบแล้วขยายโดยวงจรขยายสัญญาณ จากนั้นวัดความผิดพลาดของสัญญาณออกเทียบกับสัญญาณอ้างอิงกลับมาประมวลผลเพื่อปรับปรุงสัญญาณให้ดีขึ้นดังเช่นในบทความ [3] โดยจะสังเกตว่าวงจรที่เสนอมานี้ทั้งสองชนิดจะใช้หลักการป้อนกลับสัญญาณออกเข้าไปประมวลผลที่ตัวควบคุม ( อาจเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์หรือตัวประมวลผลอื่น ๆ ) จากนั้นจึงปรับคุณภาพของสัญญาณให้ได้สัญญาณออกที่ดีต่อไป แต่สำหรับวงจรที่จะนำเสนอในที่นี้จะอาศัยหลักการของตัวแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อกร่วมกับวงจรขยายสัญญาณที่มีคุณภาพ

ดีเพื่อที่จะจัดการป้อนกลับสัญญาณออกเข้าไปประมวลผลอีกครั้งออกไป เครื่องจ่ายกำลังที่ออกแบบแยกออกเป็น 2 วงจร คือ วงจรสร้างสัญญาณแรงดันและวงจรสร้างสัญญาณกระแส แต่ละวงจรมีโครงสร้างสำคัญ 2 ส่วนคือ ส่วนสร้างสัญญาณต้นแบบ และส่วนขยายสัญญาณ ดังรูปที่ 2

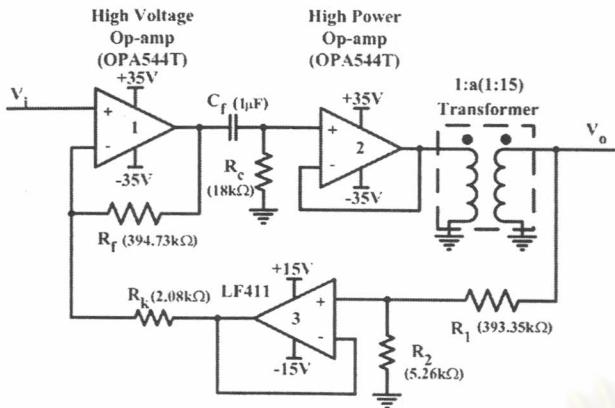


รูปที่ 2 โครงสร้างเครื่องจ่ายกำลัง

หลักการทำงานคือใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวสร้างสัญญาณต้นแบบเป็นสัญญาณแรงดันที่มีขนาดเล็กโดยใช้ตัวแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อกขนาด 16 บิต ( 16-bit Digital to Analog Converter; DAC ) ร่วมกับวงจรกรองช่วยในการสร้างสัญญาณ โดยสัญญาณแรงดันต้นแบบที่ได้จะมีลักษณะเป็นสัญญาณรูปไซน์ที่มีความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกต่ำ และสามารถปรับขนาด, เฟส รวมไปถึงความถี่ที่ต้องการได้ สัญญาณดังกล่าวจะถูกขยายโดยวงจรขยายให้มีขนาดตามต้องการโดยใช้วงจรขยายแรงดันสำหรับวงจรสร้างแรงดัน และวงจรแปลงสัญญาณแรงดันเป็นกระแสสำหรับวงจรสร้างกระแส ลักษณะสำคัญของวงจรขยายทั้งสองคือ เป็นวงจรขยายที่มีความแม่นยำ มีความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกต่ำ และมีการคุมค่าสัญญาณออกที่ดีเมื่อโหลดของวงจรมีค่าเปลี่ยนไป ทำให้เราสามารถควบคุมสัญญาณออกให้มีคุณภาพดีได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์โดยไม่ต้องมีการวัดสัญญาณออกกลับไปประมวลผลอีกครั้งเพื่อขียนั้นความเพี้ยนของสัญญาณ

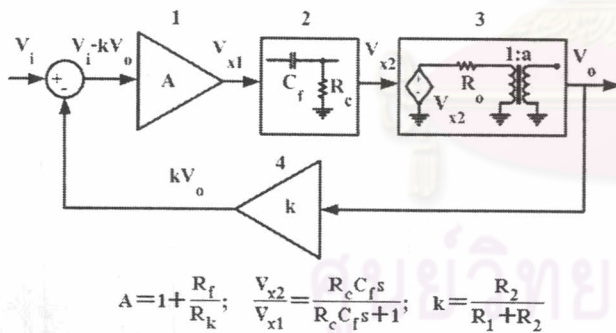
## 3. วงจรขยายแรงดัน

วงจรขยายแรงดันทำหน้าที่ขยายสัญญาณต้นแบบขนาดเล็กให้เป็นสัญญาณแรงดันออกขนาดใหญ่เพียงพอที่จะจ่ายให้มิเตอร์ โดยวงจรที่ออกแบบจะรับสัญญาณเข้าขนาด  $0-5 V_{rms}$  เพื่อขยายเป็นสัญญาณออกขนาด  $0-250 V_{rms}$  และสามารถจ่ายกำลังได้ 10 วัตต์ ลักษณะวงจรเป็นดังรูปที่ 3 เราสามารถมองวงจรในรูปแผนภาพวงจรป้อนกลับ ( Feedback Block Diagram ) ได้ดังรูปที่ 4 โดยเมื่อเทียบกับรูปที่ 3 จะได้ว่า ค่า A คือ อัตราขยายของวงจรรอปแอมป์หมายเลข 1 ซึ่งเป็นตัวกำหนดอัตราขยายไปยังหน้าของวงจร บล็อกที่ 2 ก็คือวงจรกันแรงดันออฟเซตไม่ให้นำเข้าสู่มห้อมแปลง เพื่อลดกระแสสูญเสียที่จะเกิดขึ้น ประกอบด้วย  $C_f$  และ  $R_c$  บล็อกที่ 3 เป็นวงจรขับหม้อแปลงและ โหลด โดยต้องวงจรรอปแอมป์



รูปที่ 3 โครงสร้างของวงจรขยายแรงดัน

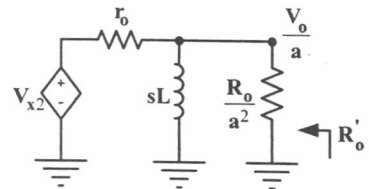
ให้มีอัตราขยายเพียงแค่ว่า 1 เพื่อลดสัญญาณออฟเซตให้ผ่านเข้าห้อมื่อแปลงให้น้อยที่สุด ในที่นี้เลือกใช้ออปแอมป์กำลังสูงเบอร์ OPA544T ของบริษัท Texas Instruments ซึ่งสามารถจ่ายแรงดันได้ถึง ± 30 V และจ่ายกระแสได้ประมาณ 2 A<sub>rms</sub> ส่วนห้อมื่อแปลงทำหน้าที่แปลงแรงดันให้สูงเพียงพอที่จะจ่ายให้กับมอเตอร์ โดยในส่วนนี้จะมองวงจรออปแอมป์เป็นแหล่งแรงดันและความต้านทานขาออก ส่วน k ในบล็อกที่ 4 คืออัตราขยายป้อนกลับของวงจร ซึ่งกำหนดโดยอัตราการแบ่งแรงดันระหว่าง R<sub>1</sub> และ R<sub>2</sub> ตามรูป เราจะเห็นว่าเราสามารถควบคุมอัตราขยายในวงจรได้โดยปรับค่า A สำหรับอัตราขยายไปข้างหน้า (Forward path gain) และปรับค่า k สำหรับอัตราขยายป้อนกลับ (Feedback gain) ทำให้เราสามารถกำหนดสมบัติของวงจรได้



$$A = 1 + \frac{R_f}{R_k}; \quad \frac{V_{x2}}{V_{x1}} = \frac{R_c C_f s}{R_c C_f s + 1}; \quad k = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

รูปที่ 4 โครงสร้างวงจรขยายแรงดันเมื่อมองแบบระบบป้อนกลับ

โครงสร้างวงจรเช่นนี้ทำให้ต้องพิจารณาสมบัติของวงจรในหลายด้านประกอบไปด้วย การคุม ค่าแรงดัน (Voltage Regulation), ผลตอบชั่วขณะ (Transient Response) และความคลาดเคลื่อนของเฟสของสัญญาณออกเทียบกับสัญญาณเข้า (Phase error) โดยจากรูปที่ 4 เราสามารถเขียนวงจรมูลในโดเมนความถี่ของวงจรในบล็อกที่ 3 ได้ดังรูปที่ 5 โดยใช้ L แทน ความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็ก (Magnetizing inductance) ของห้อมื่อแปลง ความต้านทานในขดลวดของห้อมื่อแปลงจะรวมไปกับความต้านทานขาออกของออปแอมป์เป็น r<sub>o</sub> ส่วนพารามิเตอร์อื่นจะละเลยไปโดยมองว่าห้อมื่อแปลงเป็นอุดมคติ a คือ อัตราส่วน



รูปที่ 5 วงจรมูลของวงจรขยายแรงดันที่ออกแบบ

จำนวนรอบของห้อมื่อแปลง R<sub>o</sub> คือความต้านทานทางฝั่งขาออกของห้อมื่อแปลง (ความต้านทานของวงจรแบ่งแรงดันป้อนกลับขนานกับความต้านทานโหลด) ที่ถูกย้ายผ่านห้อมื่อแปลงมาทางฝั่งออปแอมป์ V<sub>o</sub> คือแรงดันทางฝั่งขาออกของวงจรที่ถูกย้ายผ่านห้อมื่อแปลงเช่นกัน ซึ่งจากรูปที่ 4 และวงจรมูลในรูปที่ 5 ทำให้เราสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนของสัญญาณแรงดันออกเทียบกับสัญญาณแรงดันเข้าได้ดังสมการที่ 1

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{Ws^2}{Xs^2 + Ys + Z} \tag{1}$$

$$W = aA, \quad X = \left(\frac{r_o \cdot a^2}{R_o} + 1 + aAk\right)$$

$$Y = \left(\frac{r_o}{L} + \frac{r_o \cdot a^2}{R_o \cdot R_c \cdot C_f} + \frac{1}{R_c \cdot C_f}\right), \quad Z = \frac{r_o}{R_c \cdot C_f \cdot L}$$

จากสมการที่ 1 เราสามารถดูเสถียรภาพของวงจรได้โดยหาโพลของระบบ และสามารถหาผลตอบชั่วขณะของวงจรได้โดยการแปลงกลับลาปลาซเมื่อสัญญาณเข้าเป็นไซน์ ผลตอบชั่วขณะนี้เป็นตัวบอกความเร็วในการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณออกตามสัญญาณเข้า และสำหรับระบบที่มีสัญญาณเข้าเป็นไซน์ ความคลาดเคลื่อนของเฟสของสัญญาณออกเทียบกับสัญญาณเข้ามีค่าเท่ากับค่ามุมเฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบที่แทน S ด้วย jw (w แทนความถี่เชิงมุมของสัญญาณ) ซึ่งในที่นี้ก็คือมุมเฟสของ  $\frac{V_o}{V_i}(jw)$  นั่นเอง [4] โดยจะพบว่าเมื่อเราปรับค่าอัตราขยาย A มากขึ้น ความคลาดเคลื่อนของเฟสของสัญญาณออกจะน้อยลง และระบบเข้าสู่สถานะอยู่ตัวได้เร็วขึ้น แต่มีแนวโน้มที่จะทำให้เสถียรภาพของวงจรลดลง

เมื่อต้องจร และปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้เหมาะสมจนกระทั่งสมบัติของวงจรเป็นดังข้อกำหนดตามมาตรฐานที่กล่าวแล้วในหัวข้อที่ 1 จะได้วงจรตามรูปที่ 3 นอกจากนี้ยังมีการเติมตัวเก็บประจุขนาด 10 nF ขนานกับความต้านทาน R<sub>f</sub> ในรูปที่ 3 ด้วยเพื่อให้วงจรมีเสถียรภาพที่ดีขึ้น มีผลทำให้ค่า A ลดลงจากค่าที่เห็นในรูปที่ 3 มาเป็น 84.2 (คิดอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุที่ 50 Hz ขนานกับความต้านทาน 394.73 kΩ แล้วแทนค่าแทน R<sub>f</sub> ในสูตรตามรูปที่ 4) ส่วนค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ สามารถหาได้จากสมการในรูปที่ 4 ได้เป็น k = 1/75.838

สำหรับการคุมค่าแรงดันของวงจรจ่ายแรงดันนั้น เราจะดูได้จากความต้านทานขาออกของวงจร โดยถ้าวงจรมีความต้านทานขาออกต่ำก็แสดงว่ามีการคุมค่าแรงดันที่ดี เราสามารถหาความต้านทานขาออกของ

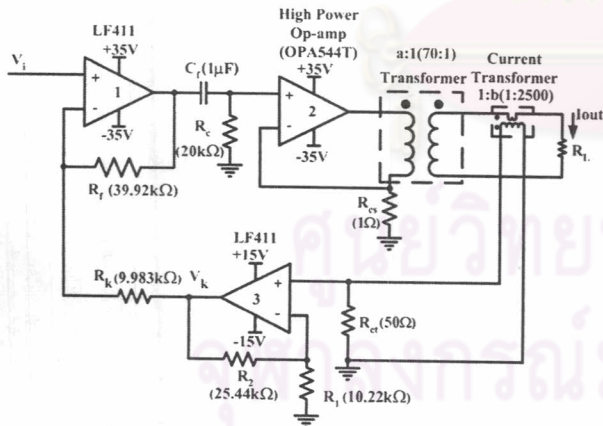
วงจรในรูปที่ 5 ได้ โดยเพื่อให้ง่ายแก่การเข้าใจ เราจะรวมพจน์  $\frac{R_o}{a^2}$  กับ  $sL$  เข้าด้วยกันแล้วมองเป็น  $Z$  และรวมพจน์ของวงจรก่อนออปโตเซตเข้ากับ  $A$  แล้วมองเป็น  $A'$  จากนั้นจึงหาความต้านทานขาออก  $R'_o$  เมื่อมองจากทางฝั่งขาออกของวงจรได้ดังสมการที่ 2

$$R'_o = \frac{a^2 r_o Z}{r_o + (1 + aA'k)Z} \quad (2)$$

จากสมการที่ 2 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มค่า  $A$  (อัตราขยายของวงจรออปแอมป์หมายเลข 1) ซึ่งมีผลให้ค่า  $A'$  เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความต้านทานขาออกของวงจรลดลง ผลที่ได้คือ การคุมค่าแรงดันของวงจรดีขึ้น ซึ่งจากพารามิเตอร์ที่กล่าวมาข้างต้น และใช้ค่า  $L$  ของวงจรหม้อแปลงเป็นค่า 0.47 H ( วัตหลวงจรสมมูลจากหม้อแปลงจริง ) ทำให้เราสามารถคำนวณค่าความต้านทานขาออกของวงจรนี้ได้เป็น 6.37  $\Omega$  และคำนวณการคุมค่าแรงดันที่โหลดขนาด 10 วัตต์ที่ 220  $V_{rms}$  ได้เป็น 0.132 % นอกจากนี้การต่อวงจรขยายแบบป้อนกลับทำให้สัญญาณออกพยายาเปลี่ยนตามสัญญาณเข้า เป็นผลให้มีความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกดีขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการป้อนกลับอีกด้วยทำให้เราสามารถควบคุมพารามิเตอร์นี้จากสัญญาณต้นแบบได้

#### 4. วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส

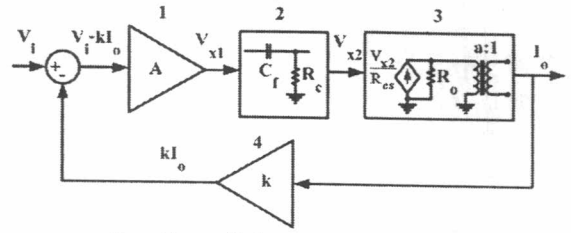
วงจรมีหน้าที่รับสัญญาณเข้าต้นแบบที่เป็นสัญญาณแรงดัน จากวงจรสร้างสัญญาณต้นแบบมาขยาย และส่งออกในรูปของสัญญาณกระแส วงจรที่ออกแบบรับสัญญาณเข้าขนาด 0-5  $V_{rms}$  แล้วขยายเป็นสัญญาณกระแสออกขนาด 0-30  $A_{rms}$  โครงสร้างของวงจรเป็นดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 โครงสร้างของวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส

วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสนี้ใช้หลักการของการป้อนกลับ เช่นเดียวกับวงจรขยายแรงดัน โครงสร้างของวงจรในรูปแบบของวงจรป้อนกลับจะมีลักษณะดังรูปที่ 7 ค่า  $A$  ในบล็อกที่ 1 คืออัตราขยายของวงจรออปแอมป์หมายเลข 1 ซึ่งทำหน้าที่กำหนดอัตราขยายไปข้างหน้าของระบบ บล็อกที่ 2 ประกอบด้วย  $C_f$  และ  $R_c$  ทำหน้าที่กันแรงดันออปโตเซตจากออปแอมป์หมายเลข 1 ไม่ให้ผ่านเข้าสู่หม้อแปลง ส่วนใน

บล็อกที่ 3 ประกอบไปด้วยออปแอมป์หมายเลข 2 ที่เป็นออปแอมป์กำลัง

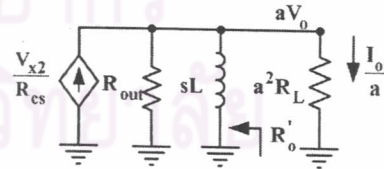


$$A = 1 + \frac{R_f}{R_k}; \quad \frac{V_{x2}}{V_{x1}} = \frac{R_c C_f s}{R_c C_f s + 1}; \quad k = \frac{1}{b} * R_{CT} * (1 + \frac{R_2}{R_1})$$

รูปที่ 7 โครงสร้างวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสเมื่อมองแบบระบบป้อนกลับ

สูง ต้องจรงให้ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแรงดันเป็นสัญญาณกระแสผ่านหม้อแปลงไปสู่โหลด อัตราขยายกำหนดโดย  $R_{cs}$  และหม้อแปลงทำหน้าที่ขยายสัญญาณกระแสส่งผ่านโหลด  $R_L$  ซึ่งในที่นี้หมายถึงความต้านทานของสายไฟที่ลัดวงจรขั้วออกของหม้อแปลงรวมไปถึงความต้านทานในวงจรวัดกระแสของมิเตอร์ด้วย โดยในรูปที่ 7 จะใช้แหล่งกระแสและความต้านทานขาออกแทนวงจรออปแอมป์ตัวนี้ สังเกตว่าหม้อแปลงต่อแบบขยายกระแส ดังนั้นอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงจะกลับกับของวงจรขยายแรงดัน ส่วนการป้อนกลับอาศัยหม้อแปลงกระแส (Current Transformer; CT) ในการวัดค่ากระแสแล้วแปลงเป็นแรงดันป้อนกลับผ่านออปแอมป์หมายเลข 3 ผ่านไปห้วงจรออปแอมป์หมายเลข 1 ต่อไป ค่าอัตราขยายของการป้อนกลับคือค่า  $k$  ดังแสดงในรูปที่ 7

เนื่องจากวงจรมีลักษณะเป็นวงจรจ่ายกระแส ดังนั้นเราจึงสนใจการคุมค่ากระแส (Current regulation) ของวงจร ร่วมกับผลตอบชั่วขณะ (Transient Response) และความคลาดเคลื่อนของเฟสของสัญญาณออกเทียบกับสัญญาณเข้า (Phase error) ซึ่งเราสามารถวิเคราะห์ได้โดยการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจร โดยหาจากวงจรมสมมูลในโดเมนความถี่ของวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสในบล็อกที่ 3 เมื่อ  $R_{cs}$  เป็น  $1 \Omega$  ทำให้อัตราการแปลงแรงดันเป็นกระแสเป็นหนึ่งดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 วงจรสมมูลของวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส

จากวงจรมสมมูล เรามองวงจรมนี้เป็นแหล่งกระแส โดย  $R_{out}$  คือความต้านทานขาออกของวงจรออปแอมป์หมายเลข 2 ที่ต่อเป็นแหล่งจ่ายกระแส  $L$  แทนความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็ก (Magnetizing inductance) ของหม้อแปลง ส่วนพารามิเตอร์อื่นจะละเลยไปโดยมองว่าหม้อแปลงเป็นอุดมคติ  $a$  เป็นอัตราขยายกระแสของหม้อแปลง ส่วน  $R_L$  เป็นความต้านทานทางฝั่งขาออกของหม้อแปลงที่ขยายผ่านหม้อแปลงมาทาง



ฝั่งออปแอมป์เช่นเดียวกับ  $I_o$  และ  $V_o$  จากรูปที่ 7 และวงจรสมมูลในรูปที่ 8 ทำให้เราสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนของสัญญาณแรงดันออกเทียบกับสัญญาณแรงดันเข้าได้ดังสมการที่ 3

$$\frac{I_o(s)}{V_i} = \frac{Ws^2}{Xs^2 + Ys + Z} \quad (3)$$

$$W = aA, \quad X = \left( \frac{a^2 \cdot R_L}{R_{out}} + 1 + aAk \right)$$

$$Y = \left( \frac{a^2 \cdot R_L}{R_{out} \cdot R_c \cdot C_f} + \frac{1}{R_c \cdot C_f} + \frac{a^2 \cdot R_L}{L} \right), \quad Z = \frac{a^2 R_L}{L \cdot R_c \cdot C_f}$$

จากสมการที่ 3 เราสามารถดูเสถียรภาพของวงจรได้โดยหาโพลของระบบ และสามารถหาผลตอบชั่วขณะได้โดยการแปลงกลับลาปลาซ ส่วนความคลาดเคลื่อนของเฟสของสัญญาณออกสำหรับระบบที่มีสัญญาณเข้าเป็นสัญญาณรูปไซน์ ก็หาได้จากมุมเฟสของ  $\frac{I_o}{V_i}(j\omega)$  เช่นเดียวกับของวงจรขยายแรงดัน โดยจะพบว่าเมื่อปรับค่าอัตราขยาย A มากขึ้น ระบบมีความคลาดเคลื่อนของเฟสของสัญญาณออกน้อยลง และระบบเข้าสู่สถานะอยู่ตัวได้เร็วขึ้น แต่มีแนวโน้มที่จะทำให้เสถียรภาพของวงจรลดลง สำหรับค่าอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรเป็นดังรูปที่ 6 โดยหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้เป็น  $A = 4.99$  และ  $k = 14.33$  นอกจากนี้ค่าความต้านทานที่เป็นโหลดของวงจรจะถูกจำกัดที่ค่าไม่เกิน  $8 \text{ m}\Omega$  เนื่องจากความสามารถในการจ่ายแรงดันของออปแอมป์ที่ใช้ด้วย

สำหรับการคุมค่ากระแสของวงจร เป็นความสามารถคงค่ากระแสขาออกของวงจรเมื่อโหลดของวงจรเปลี่ยนไป (เช่น ในกรณีที่เปลี่ยนความยาวของสายไฟที่ติดตั้งด้านขาออกของหม้อแปลง) ซึ่งสามารถดูแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่าได้โดยหาความต้านทานขาออกของวงจร โดยสำหรับวงจรจ่ายกระแส ค่าความต้านทานขาออกของวงจรยิ่งมากยิ่งทำให้การคุมค่ากระแสดีขึ้น เพื่อให้ง่ายแก่การเข้าใจ เราจะรวม A กับพจน์ของวงจรถัดไปเพื่อเข้าด้วยกันแล้วเรียกเป็น A' และรวม  $R_{out}$  และ sL เป็น Z แล้วจึงหาความต้านทานขาออก  $R'_o$  เมื่อมองจากฝั่งขาออกของวงจรได้ดังสมการที่ 4

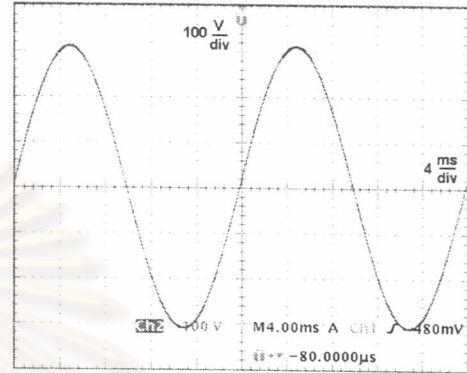
$$R'_o = \frac{Z(1 + aA'k)}{a^2} \quad (4)$$

ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อเพิ่มค่า A (อัตราขยายของวงจร ออปแอมป์หมายเลข 1) ซึ่งมีผลทำให้ค่า A' เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความต้านทานขาออกของวงจรจ่ายกระแสเพิ่มขึ้น นั่นคือการคุมค่ากระแสของวงจรดีขึ้น ซึ่งจากพารามิเตอร์ที่กล่าวมาข้างต้น และใช้ค่า L ของวงจรหม้อแปลงเป็นค่า  $2.45 \text{ H}$  (วัดทางจรมมูลจากหม้อแปลงจริง) สามารถคำนวณค่าความต้านทานขาออกตามสมการที่ 4 ได้เป็น  $4.04 \Omega$  แล้วคำนวณการคุมค่ากระแสของวงจรได้เป็น  $0.149\%$  ที่โหลดขนาด  $6 \text{ m}\Omega$  และเช่นเดียวกับวงจรขยายแรงดัน การต่อวงจรขยายแบบป้อนกลับก็ทำให้สัญญาณออกมีความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกดีขึ้นด้วย

5. ผลการทดลอง

5.1 ผลการทดลองของวงจรขยายแรงดัน

ต่อวงจรตามที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ 3 แล้วทดลองการทำงานโดยจ่ายสัญญาณเข้า เพื่อให้ได้สัญญาณออกมีขนาดเป็น  $220 \text{ V}_{rms}$  และจ่ายโหลดมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า 5 ตัว ลักษณะสัญญาณแรงดันขาออกวัดโดย Oscilloscope เป็นดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 สัญญาณออกของวงจรขยายแรงดัน

จากนั้นจึงวัดสมบัติต่าง ๆ ของ วงจรขยายที่ออกแบบ โดยเทียบกับวงจรที่ไม่มีป้อนกลับ ( วงจรในรูปที่ 3 ที่ติดตั้งวงจรป้อนกลับออกไป ) โดยจ่ายโหลดเป็นมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า 5 ตัว ได้ผลเป็นดังตารางที่ 1 ซึ่งจากผลการวัดที่ได้จะเห็นว่า การป้อนกลับทำให้สัญญาณออกมีคุณภาพดีขึ้น

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรขยายแรงดันจากการทดลอง

พารามิเตอร์ที่สนใจ*	วงจรที่นำเสนอ	วงจรที่ไม่มีป้อนกลับ
Voltage regulation**	0.086 %	1.38%
1% Settling time	≈50 ms	≈100 ms
Phase error (degrees)	1.622	43.2
Total Harmonic Distortion***	0.107 %	0.805 %

\* ความถี่ที่ใช้ทดลอง คือ 50 Hz

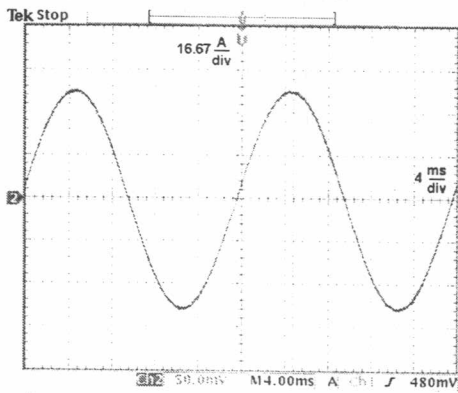
\*\* การคุมค่าแรงดัน คิดที่แรงดัน  $220 \text{ V}_{rms}$  โหลดกินกำลังงาน 6.6 วัตต์

\*\*\* ค่า Total Harmonic Distortion (THD) คิดที่ความถี่มูลฐาน 50 Hz จำนวนฮาร์มอนิก = 20 และค่า THD ของสัญญาณเข้า เป็น  $0.014\%$  วัดโดยใช้ Dynamic Signal Analyzer ของบริษัท Agilent รุ่น 35670A

5.2 ผลการทดลองของวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส

ต่อวงจรตามรูปที่ 6 จ่ายแรงดันให้ได้กระแสออกเป็น  $30 \text{ A}_{rms}$  วัดรูปสัญญาณกระแสโดยใช้วงจรวัดกระแสที่มีอัตราส่วนการแปลงกระแสเป็นแรงดันเป็น  $3 \text{ mV/A}$  ได้ดังรูปที่ 10 จากนั้นวัดสมบัติต่าง ๆ ของวงจรขยายที่ออกแบบ โดยเทียบกับวงจรที่ไม่มีป้อนกลับ ( วงจรในรูปที่ 6 ที่ติดตั้งวงจรป้อนกลับออกไป ) และโหลดที่ใช้สำหรับหาค่าพารามิเตอร์คือ สายไฟนำกระแส มีความยาว  $2.45 \text{ m}$  มีความต้านทาน

ภายในประมาณ 5.39 mΩ ได้ผลเป็นดังตารางที่ 2



รูปที่ 10 สัญญาณกระแสจากวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสจากการทดลอง

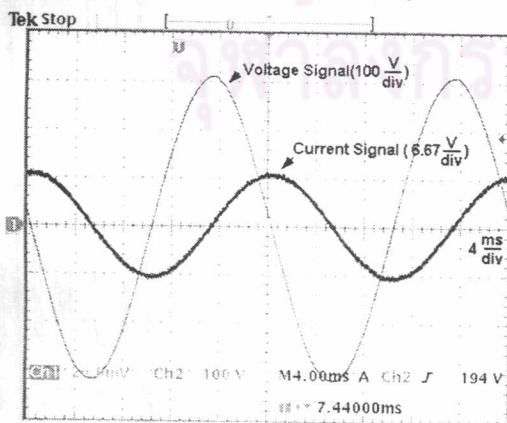
พารามิเตอร์ที่สนใจ	วงจรที่นำเสนอสื่อ	วงจรที่ไม่มีการป้อนกลับ
Current regulation **	0.133 %	2.66%
1% Settling time	≈60 ms	≈100 ms
Phase error (degrees)	0.6794	11.047
Total Harmonic Distortion ***	0.072 %	0.798 %

\* ความถี่ที่ใช้ทดลองคือ 50 Hz

\*\* คิครณมีไม่มีโหลดคือ สายไฟขนาดสั้นที่มีความต้านทานประมาณ 0.66 mΩ และทดลองที่ค่ากระแส 30 A ส่วนโหลดคิกำลังงาน 4.85 วัตต์

\*\*\* ค่า Total Harmonic Distortion (THD) คิครณที่จำนวนฮาร์โมนิก = 20 และค่า THD ของสัญญาณเข้า เป็น 0.011 %

จากผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่าวงจรที่ป้อนกลับให้สัญญาณออกที่มีคุณภาพดีกว่าวงจรที่ไม่มีการป้อนกลับ นอกจากนี้ยังได้ลองจ่ายสัญญาณแล้วปรับความต่างเฟส โดยจ่ายแรงดันขนาด 220 V<sub>rms</sub> และกระแสขนาด 5.3 A<sub>rms</sub> และปรับความต่างเฟสเป็น 90 องศา แล้ววัดสัญญาณได้ดังรูปที่ 11 ( ใช้วิธีวัดกระแสเช่นเดียวกับรูปที่ 10 )



รูปที่ 11 รูปสัญญาณแรงดันและกระแสที่สร้างให้มีความต่างเฟส

## 6. สรุป

การออกแบบวงจรขยายสัญญาณสำหรับใช้ในวงจรจ่ายกำลังสำหรับทดสอบมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าโดยใช้โอปแอมป์และหม้อแปลงร่วมกับโครงสร้างแบบวงจรป้อนกลับ ทำให้งจรมีการคุมค่าสัญญาณแรงดันและกระแสขาออกที่ดี มีความคลาดเคลื่อนของเฟสของสัญญาณออกน้อย มีความถี่ที่ และมีความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกต่ำ ซึ่งช่วยให้การสร้งและควบคุมสัญญาณออกไม่ยุ่งยากและสามารถนำไปใช้ทดสอบมิเตอร์ได้

## 7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากแหล่งทุนต่าง ๆ ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้แก่ โครงการศึกษักันคุณิ กองทุนรัชดาภิเษกสมโภชและบัณฑิตวิทยาลัย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] International Electrotechnical Commission, "IEC687 Alternation Current Static Watt-hour Meters for Active energy (Class 0.2 s and 0.5 s)," CEI, 1992.
- [2] Peter Zajec and Janez Nastran, "Power Calibrator Using Switched Mode Voltage Source," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol.49, no.2, August 2000.
- [3] Andrew Gubisch, Paul L. Lualdi, Jr., Petar N. Miljanic, and James L. West, "Power Calibrator Using Sampled Feedback for Current and Voltage," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 46, no. 2, April 1997.
- [4] Katsuhiko Ogata, "Modern Control Engineering," Prentice Hall, New Jersey, 1997.



สรารุช เมชวี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2544 ปัจจุบันกำลังศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ณ สถาบันเดียวกัน



เอกชัย สีลาสิรมิ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2517 ในปี พ.ศ. 2519 ถึง พ.ศ. 2525 ได้รับทุนอานันทมหิดล เพื่อไปศึกษาต่อในระดับปริญญาโทและเอก ณ University of California at Berkeley ประเทศสหรัฐอเมริกา

ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย งานวิจัยที่สนใจอยู่ในความสนใจคือ โปรแกรมจำลองการทำงานของวงจรไฟฟ้า, การสังเคราะห์เสียงภาษาไทย, ระบบคำบรรยายภาพในเครื่องรับโทรทัศน์ และการออกแบบวงจรรวม

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสรารุช เมธาวิ เกิดวันที่ 26 พฤศจิกายน พุทธศักราช 2522 ที่จังหวัดเพชรบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2544 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า แขนงวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษาเดียวกัน



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย