

วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 1 เฟสแบบ SEPIC ที่มีค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่งโดยประยุกต์ใช้หลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า

Single Phase AC-DC SEPIC Converter with Nearly Unity Power Factor

Applied Electrical Power Balance

* ประหยัด กงสุข และ ** วิบูลย์ ชื่นแขก

* สาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี
ถนนบาราศนราคร กิ่งอำเภอเขาชะเมา จันทบุรี 22210 โทร 0-3930-7261-4 ต่อ 109 โทรสาร 0-3930-7268 E-mail: pkongsuk@yahoo.com

**ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 1518 ถนนพิบูลสงคราม บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทร 0-2913-2500 ต่อ 8518, 8416 โทรสาร (02) 5857350 E-mail: vck@kmitb.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการออกแบบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส 220 V เป็นไฟฟ้ากระแสตรง 48 V โดยใช้วงจรกำลังแบบซีพิก (SEPIC) ให้ทำงานในโหมดกระแสไหลต่อเนื่อง การออกแบบระบบควบคุมจะใช้หลักการสมดุลกำลังไฟฟ้าซึ่งง่ายต่อการวิเคราะห์ร่วมกับการควบคุมแบบสไลด์ดิ้งโหมด ซึ่งเป็นระบบควบคุมที่มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์และให้ผลตอบสนองไว

จากการจำลองและผลการทดสอบการทำงานที่ภาระตั้งแต่ 10 - 100 % ของพิกัด 250 วัตต์ พบว่าระบบควบคุมสามารถให้ผลตอบสนองไวและให้ค่าตัวประกอบกำลังมากกว่า 0.99 และให้ค่า THDi น้อยกว่า 4 % ที่ภาระสูงสุด

คำสำคัญ : การสมดุลกำลังไฟฟ้า, การปรับปรุงตัวประกอบกำลัง

Abstract

This paper presents the design method of a single phase AC-DC SEPIC converter. It operated in continuous inductor current mode (CCM). The design method is based on electrical power balance which simple to analysis. The sliding mode control used to common design which robust and good dynamic response.

Simulation and experimental results at 10 to 100 % of full load 250 Watt. The system shows good dynamic response. The circuit operated at ac input voltage 220 V, dc output voltage 48 V. It offers power factor greater than 0.99 with THD input current of 3.16 % at maximum load.

Keywords : electrical power balance, power factor correction

1. คำนำ

ในปัจจุบันได้มีมาตรฐานเพื่อกำหนดขีดจำกัดที่ยอมรับได้ของระดับความเพี้ยนของแรงดันที่เกิดจากฮาร์มอนิก (Harmonic Voltage Distortion) และระดับความเพี้ยนของกระแสที่เกิดจากฮาร์มอนิก (Harmonic Current Distortion) ของอุปกรณ์ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งได้แก่ มาตรฐาน IEC 1000-3-2 กำหนดให้อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าหรืออิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้กระแสสลับน้อยกว่าหรือเท่ากับ 16 A ต่อเฟส จะควบคุมมีปริมาณกระแสฮาร์มอนิกอยู่ในมาตรฐานที่กำหนด หรือมาตรฐาน IEEE 519 กำหนดข้อจำกัดของฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วม (Point of Common Coupling , PCC) [1] สำหรับประเทศไทยได้มีข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม โดยคณะกรรมการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า ซึ่งมาจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย การไฟฟ้านครหลวง และ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [5]

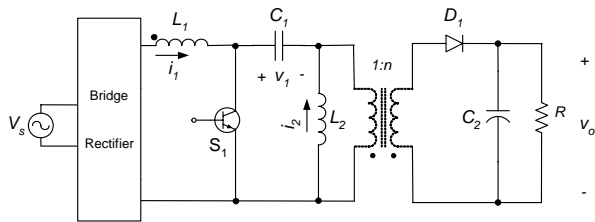
ดังนั้นเพื่อลดปัญหาที่เกี่ยวข้องกับฮาร์มอนิกสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องการแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง จึงควรมีการควบคุมกระแสด้านเข้าให้มีมุมและรูปร่างใกล้เคียงกับแรงดันมากที่สุดที่เรียกว่าการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง (Power Factor Correction) โดยใช้วิธีการสวิตซ์ ซึ่งวงจรที่นิยมใช้ได้แก่ วงจรแปลงผันแบบบูส (Boost Converter) แต่มีข้อจำกัดคือแรงดันด้านออกจะมีค่าสูงกว่าแรงดันด้านเข้า วงจรแปลงผันแบบบัค-บูส (Buck-Boost Converter) และวงจรแปลงผันแบบชุก (Cuk Converter) ซึ่งมีข้อเสียคือให้แรงดันด้านออกกลับขั้วกับแรงดันด้านเข้า ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวจึงเลือกใช้วงจรแปลงผันแบบซีพิก (Single Ended Primary Inductor Converter: SEPIC) ซึ่งมีข้อดีคือสามารถกำหนดแรงดันให้สูงหรือต่ำได้ในจังหวะเดียว (Single Stage) โดยใช้สวิตซ์เพียงตัวเดียว [6]

ในงานวิจัยนี้เป็นการนำเอาหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้าในด้านเข้าให้เท่ากับกำลังไฟฟ้าด้านออกมาประยุกต์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การ

ควบคุมร่วมกับกระบวนการควบคุมแบบสไลด์ดิ้ง (Sliding Mode Control) เพื่อนำมาควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบซิงคิลิให้ทำงานในภาวะกระแสต่อเนื่อง (Continuous Conduction Mode: CCM) เพื่อให้ได้รูปคลื่นกระแสด้านเข้าใกล้เคียงสัญญาณไซน์ (Sine Wave) และตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง

2. หลักการของวงจรแปลงผันแบบซิงคิลิ

วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบซิงคิลิที่นำเสนอซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ วงจรเรียงกระแส (Bridge Rectifier) และวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบซิงคิลิแบบมีหม้อแปลงคั่น (Isolate) ทางไฟฟ้าดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 วงจรแปลงผันไฟสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบซิงคิลิ

2.1 การวิเคราะห์หาสมการแบบจำลองของวงจรแปลงผัน

จากรูปแบบสมการสเปซ (State Space) โดยทั่วไป [3] คือ

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u + \mathbf{F} \quad (1)$$

โดย กำหนดให้

$$\mathbf{x} = [i_1 \quad i_2 \quad v_1 \quad v_o]^T \quad (2)$$

โดยที่ \mathbf{A} คือเมทริกซ์ของพารามิเตอร์ที่ไม่คิดค่าสถานะของสวิตช์ (Switch Status) u \mathbf{B} คือเวกเตอร์ของพารามิเตอร์ที่คิดค่าสถานะของสวิตช์ และ \mathbf{F} คือเวกเตอร์ของพารามิเตอร์ที่มีเทอมของแหล่งจ่าย

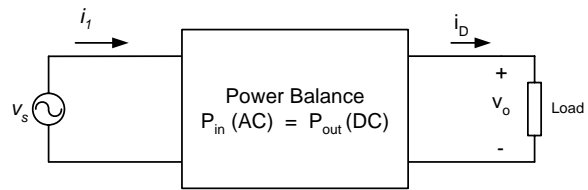
เมื่อทำการโอนย้ายค่าพารามิเตอร์จากด้านทุติยภูมิไปไว้ด้านปฐมภูมิ จากนั้นหาค่าสมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสถานะกับพารามิเตอร์ของวงจรในสภาวะที่สวิตช์ปิด (Switch On) และสวิตช์เปิด (Switch Off) โดยวงจรทำงานแบบกระแสต่อเนื่อง คุณสมบัติในสภาวะสวิตช์ปิดด้วย u และสภาวะสวิตช์เปิดด้วย $1-u$ จากนั้นนำสมการทั้งสองสภาวะมารวมกันจะได้รูปแบบตามสมการที่ (1) [3-4] ดังนี้

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{L_1} & -\frac{1}{nL_1} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{nL_2} \\ \frac{1}{C_1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{nC_2} & \frac{1}{nC_2} & 0 & -\frac{1}{RC_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ v_1 \\ v_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{v_1 + v_o/n}{L_1} \\ \frac{v_1 + v_o/n}{L_2} \\ -\frac{i_1 + i_2}{C_1} \\ -\frac{i_1 + i_2}{nC_2} \end{bmatrix} u$$

$$+ \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} |v_s| \quad (3)$$

2.2 การออกแบบระบบควบคุม

2.2.1 หลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า พิจารณาจากกำลังไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้าเท่ากับกำลังไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกดังรูปที่ 2

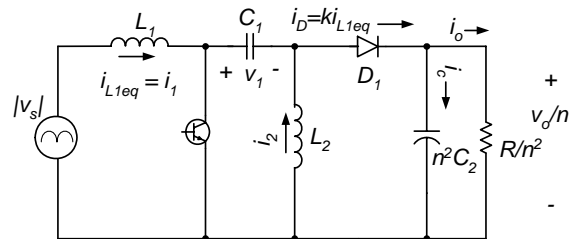


รูปที่ 2 การสมดุลกำลังไฟฟ้าด้านเข้ากับด้านออก

จากรูปที่ 2 ถ้ากำหนดให้ $i_1 = i_{L1eq}$ จะได้

$$v_s i_{L1eq} = v_o i_D \quad (4)$$

เมื่อนำรูปที่ 1 มาพิจารณาบนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้าจะสามารถเขียนรูปใหม่ได้ดังรูปที่ 3 [7]



รูปที่ 3 วงจรแปลงผันบนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า

จากรูปที่ 3 และสมการที่ (4) สามารถเขียนความสัมพันธ์ของ i_D และ i_{L1eq} ได้เป็น

$$i_D = \left(\frac{v_s}{v_o} \right) i_{L1eq} = k i_{L1eq} \quad (5)$$

โดยที่

$$i_{L1eq} = \frac{1}{k} i_D = \frac{1}{k} (i_c + i_o) \quad (6)$$

เนื่องจาก $i_c = n^2 C_2 \frac{dv_o}{ndt}$ และ $i_o = \frac{v_o/n}{R/n^2}$ ดังนั้นสมการที่ 6 เขียนได้ใหม่เป็น

$$i_{L1eq} = \frac{n}{k} \left(C_2 \frac{dv_o}{dt} + \frac{v_o}{R} \right) \quad (7)$$

เมื่อพิจารณากับวงจรแปลงผันดังรูปที่ 3 จะได้กระแส i_{L1eq} ซึ่งจะนำไปคูณกับสัญญาณไซน์เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์ต่อไป

2.2.1 การควบคุมแบบสไลด์ดิ้งโหมด จากสมการที่ (3) มีจำนวนตัวแปรสแตตที่ที่จะต้องควบคุมตามวิธีการควบคุมแบบสไลด์ดิ้งจำนวน 4 ตัวแปร โดยการกำหนดให้ สมการพื้นผิวสไลด์ดิ้งเป็นผลรวมเชิงเส้น (Linear Combination) ของ error ตัวแปรสแตต [3-4] ดังนี้

$$\sigma = K_1 e_1 + K_2 e_2 + K_3 e_3 + K_4 e_4 = 0 \quad (8)$$

เมื่อ K_i คือตัวคูณเพื่อปรับความเหมาะสม e_i คือ error ของตัวแปรสแตต

จากสมการที่ (8) หากควบคุมทุกตัวแปรสแตตจะทำให้การวิเคราะห์มีความยุ่งยากและต้องใช้อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ (Sensor) หลายตัว เพื่อให้การวิเคราะห์มีความง่ายขึ้นและใช้อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณน้อยลงจึงมีการพิจารณาเงื่อนไขที่พอเพียงในสภาวะคงอยู่ของสไลด์ดิ้งโหมด [2-3] คือ

$$\mathbf{K}^T \mathbf{A}_4 \leq 0 \quad (9)$$

เมื่อ

$$\mathbf{K}^T = [K_1 \quad K_2 \quad K_3 \quad K_4] \quad (10)$$

และ \mathbf{A}_4 คือหลักที่ 4 ของเมทริกซ์ \mathbf{A} ในสมการที่ (1) ดังนั้นสมการที่ (9) จะได้

$$-\frac{K_1}{nL_1} - \frac{K_2}{nL_2} - \frac{K_4}{RC_2} \leq 0 \quad (11)$$

จากสมการที่ (9) และ (11) สามารถลดตัวแปรเพื่อที่จะลดอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณและจัดรูปไปเข้ากับสมการที่ (9) ได้ดังนี้

$$\sigma = K_4 e_4 = 0 \quad (12)$$

การหาค่า K_4 ทำได้โดยกำหนดสมการพื้นผิวสไลด์ดิ้งเป็น

$$\sigma = \frac{de_4}{dt} + K_4 e_4 \quad (13)$$

เนื่องจาก $e_4 = \frac{1}{n}(v_o - V_{oref})$ และ V_{oref} / n มีค่าคงที่ จะได้

$$\sigma = \frac{dv_o}{ndt} + \frac{K_4}{n}(v_o - V_{oref}) \quad (14)$$

แทนค่าตัวแปรสมการที่ (3) ลงใน สมการที่ (14) จะได้สมการพื้นผิวสไลด์ดิ้งเป็น

$$\sigma = \frac{(1-u)}{n} \left(\frac{i_1 + i_2}{nC_2} \right) + \frac{v_o}{RC_2} + \frac{K_4}{n} (v_o - V_{oref}) \quad (15)$$

หาอนุพันธ์ของสมการที่ (15) จากเงื่อนไขของสภาวะคงอยู่และกฎการสวิตช์ ของวิธีสไลด์ดิ้งโหมด [2-3] โดยนำค่าในตัวแปรสแตตที่ปรากฏของสมการที่ (3) มาแทนค่าอีกครั้ง [6]

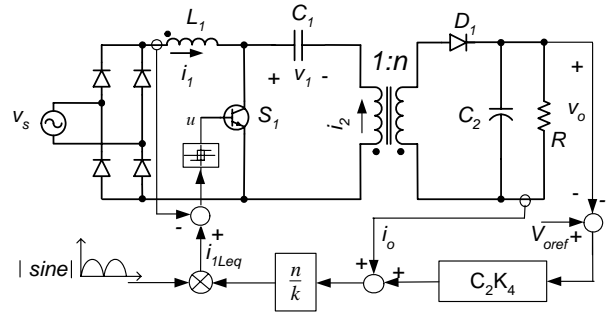
เมื่อระบบอยู่ในสภาวะสมดุลสมการพื้นผิวสไลด์ดิ้งจะเป็นดังสมการที่ (12) จึงสามารถหาค่าอนุพันธ์ของ v_o ได้ดังนี้

$$\frac{dv_o}{dt} = -K_4 (v_o - V_{oref}) \quad (16)$$

แทนค่าสมการที่ (16) ลงในสมการที่ (11) และแทน $\frac{V_o}{R}$ ด้วย i_o เป็นสมการควบคุมได้เป็น

$$i_{L1eq} = \frac{n}{k} (C_2 K_4 (V_{oref} - v_o) + i_o) \quad (17)$$

จากสมการที่ (17) สามารถนำไปสร้างแบบจำลองการควบคุมและออกแบบวงจรควบคุมดังรูปที่ 4

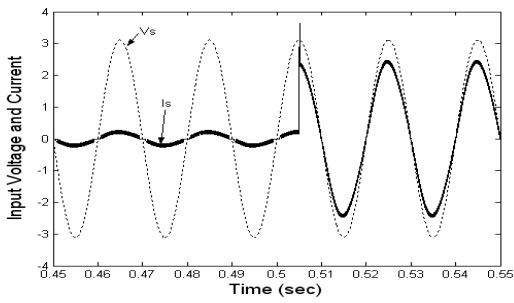


รูปที่ 4 การควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้าตรงแบบซิงคิล โดยประยุกต์ใช้หลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า

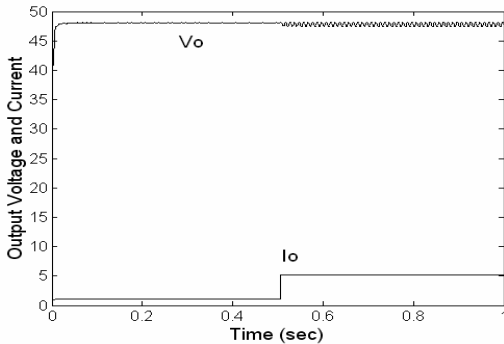
5. การจำลองการทำงานและผลการทดลอง

จากรูปที่ 4 จะถูกนำไปสร้างแบบจำลองและวงจรจริงเพื่อทดสอบการควบคุม โดยใช้ค่าพารามิเตอร์เดียวกันดังนี้ คือ $V_s = 220$ V, $L_1 = 8$ mH, $L_2 = 2.3$ mH, $f_s = 50$ Hz, $C_1 = 0.44$ μ F, $C_2 = 20400$ μ F, $V_o = 48$ V, $k = 2.22$, $K_4 = 150$, $P_o (\max) = 250$ W, $P_o (\min) = 25$ W, $n = 0.5$

5.1 ผลการจำลองการทำงาน การจำลองการทำงานโดยการเปลี่ยนภาระจาก 25 W เป็น 250 W พบว่าระบบสามารถควบคุมให้กระแสด้านเข้าเป็นรูปคลื่นไซน์ได้อย่างรวดเร็ว โดยผลตอบสนองของแรงดันและกระแสด้านเข้าดังรูปที่ 5 ส่วนแรงดันและกระแสด้านออกดังรูปที่ 6 ตามลำดับ

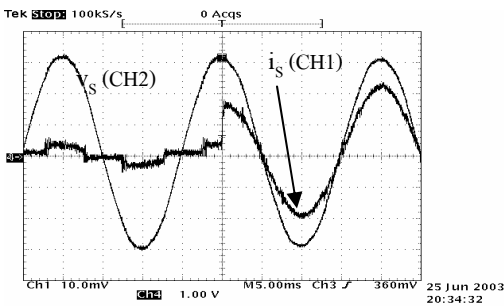


รูปที่ 5 แรงดันและกระแสด้านเข้าขณะเปลี่ยนภาระจาก 25 W เป็น 250 W

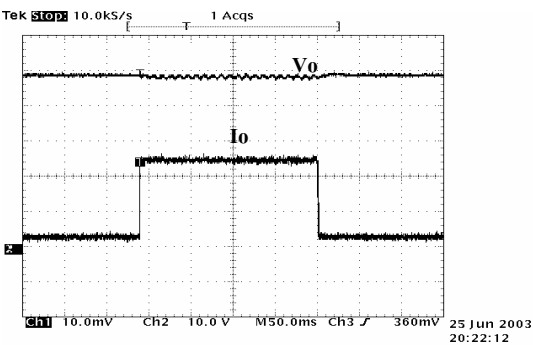


รูปที่ 6 แรงดันและกระแสด้านออกขณะเปลี่ยนภาระ 25 W เป็น 250 W

5.2 ผลการทดลอง พบว่าระบบควบคุมกระแสด้านเข้าเข้าสู่สภาวะคงตัวรวดเร็วในเวลา 1 รูปคลื่น



รูปที่ 7 แรงดันและกระแสด้านเข้าขณะเปลี่ยนภาระจาก 25 W เป็น 250 W V_s 100V/DIV, i_s 1A/DIV, time 5 mS/DIV



รูปที่ 8 แรงดันและกระแสด้านเข้าขณะเปลี่ยนภาระจาก 25 W เป็น 250 W V_o 10V/DIV, I_o 2A/DIV, time 40 mS/DIV

6. สรุป

การประยุกต์ใช้หลักการสมมูลกำลังไฟฟ้าและวิธีสไลด์ดิ้งโหมดกับวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบซีทิก เพื่อควบคุมตัวประกอบกำลังของไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้า ให้ใกล้เคียงหนึ่งและแรงดันไฟตรงขาออกให้คงที่นั้น จากผลการทดสอบการทำงานพบว่าระบบมีความสามารถตอบสนองสภาวะการเปลี่ยนแปลงของภาระได้ดี และสามารถควบคุมวงจรแปลงผันให้มีค่าตัวประกอบกำลังมากกว่า 0.99, THD ของกระแสด้านเข้า 3.16 % ที่ภาระสูงสุด

เอกสารอ้างอิง

- [1] Thomas S. Key, Jih-sheng Lai, "IEEE and International Harmonic Standards Impact on Power Electronic Equipment Design" IEEE IECON, New Orleans, LA, pp. 430-436, 1998.
- [2] V. I. Utkin, "Sliding Modes and Their Application in Variable Structure Systems," MIR Publishers, 1978.
- [3] G. Spiazzi, P. Mattavelli, L. Rossetto, L. Malesani, "Application of Sliding Mode Control to Switch-Mode Power Supplies," Journal of Circuits, Systems and Computers (JCSC), Vol. 5, pp. 337-354, 1995.
- [4] L. Malesani, L. Rossetto, G. Spiazzi, P. Tenti, "Performance Optimization of Cuk Converter by Sliding Mode Control," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 10, pp. 302-309, 1995.
- [5] คณะกรรมการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า, "ข้อกำหนดคุณเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม" การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, PRC-PQG-01, 1998.
- [6] ประหยัด กองสุข. "การวิเคราะห์และออกแบบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบ SEPIC ที่มีค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่งโดยประยุกต์ใช้วิธีการควบคุมแบบสไลด์ดิ้ง," วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2546.



นายประหยัด กองสุข มีความสนใจงานวิจัยทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่น การแก้ตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้า



รศ.ดร.วิบูลย์ ชื่นแขก มีความสนใจงานวิจัยทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังและมีประวัติการวิจัยคือ Interleaved Switching Topology For Three-Phase Power-Factor Correction, วงจร 3 เฟส เอช-ซี คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้สวิตช์เพียงตัวเดียวและมีกระแสฮาร์มอนิกต่ำ เป็นต้น