

การประยุกต์ใช้หลักการสมดุลกำลังไฟฟ้าสำหรับวงจรแปลงผันไฟฟ้า

กระแสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 1 เฟสแบบ SEPIC

Applied Power Balance Techniques for Single Phase AC-DC SEPIC Converter

ประหัด กองสุข

สาขาเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี

ถนนบาราศณราดูร อำเภอเขาชีชมภู จังหวัดจันทบุรี 22210

โทร 0-3930-7261-4 ต่อ 109 โทรสาร 0-3930-7268 E-mail: pkongsuk@yahoo.com

บทคัดย่อ—บทความนี้นำเสนอวิธีการออกแบบการปรับปรุ้ดัวประกอบกำลังสำหรับวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสลับ เป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้วงจรกำลังแบบซีพิก (SEPIC) ให้ทำงานในโหมดกระแสไหลต่อเนื่อง การออกแบบระบบควบคุมจะใช้หลักการสมดุลกำลังไฟฟ้าระหว่างกำลังไฟฟ้ากระแสลับด้านเข้าและกำลังไฟฟ้ากระแสตรงด้านออก มาใช้ในการวิเคราะห์ ร่วมกับหลักการควบคุมแบบสไลด์คิงโหมด ซึ่งเป็นระบบควบคุมที่มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ และให้ผลตอบสนองของกระแสและแรงดันที่ดี

จากการจำลองผลการทำงานที่ภาระตั้งแต่ 10 - 100 % ของพิกัด 500 วัตต์ โดยมีค่าแรงดันด้านเข้ากระแสลับ 220 โวลต์ และแรงดันด้านออกกระแสตรง 48 โวลต์ พบว่าระบบควบคุมสามารถให้ผลตอบสนองไวและให้ค่าตัวประกอบกำลังที่ดี

คำสำคัญ : หลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า, การปรับปรุ้ดัวประกอบกำลัง

Abstract—This paper presents the design power factor correction of a single phase AC-DC SEPIC converter. It operated in continuous inductor current mode (CCM). The design method is based on power balance techniques between the AC power input and DC power output. The sliding mode control used to common design which robust and good dynamic response. The simulation results at 10 to 100 % of full load 500 Watt. The system shows good dynamic response. The circuit operated at ac input voltage 220 V, dc output voltage 48 V.

Keywords : power balance techniques, power factor correction

1. คำนำ

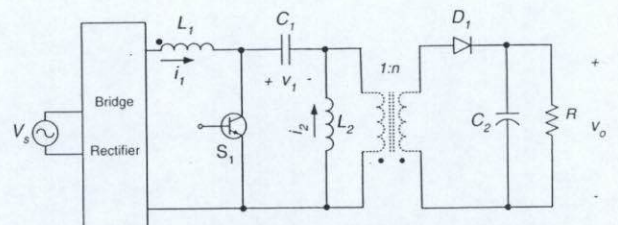
ในปัจจุบันได้มีการกำหนดมาตรฐานของระดับความเพี้ยนของแรงดันที่เกิดจากฮาร์โมนิก (Harmonic Voltage Distortion) และระดับความเพี้ยนของกระแสที่เกิดจากฮาร์โมนิก (Harmonic Current Distortion) ของอุปกรณ์ไฟฟ้าซึ่งได้แก่ มาตรฐาน IEC 1000-3-2 มาตรฐาน IEEE 519 กำหนดข้อจำกัดของฮาร์โมนิกที่จุดต่อร่วม (Point of Common Coupling, PCC) [1] สำหรับประเทศไทยได้มีข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์โมนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม โดยคณะกรรมการปรับปรุ้ดัวความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า ซึ่งมาจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย การไฟฟ้านครหลวง และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [5] ทั้งนี้เนื่องจากเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าฮาร์โมนิกเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดผลกระทบต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าทำงานผิดพลาดและมีอายุใช้งานที่สั้นลง

เนื่องจากอุปกรณ์หรือเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีใช้กันอยู่ทั่วไปที่ต้องการแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง จึงมีความจำเป็นที่จะต้องควบคุมปริมาณฮาร์โมนิกที่เกิดจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าง่ายๆ เพื่อให้อุปกรณ์ไฟฟ้าได้มาตรฐานตามข้อกำหนดที่กล่าวไว้ข้างต้น โดยควรมีการควบคุมกระแสด้านเข้าให้มึนและรูปร่างใกล้เคียงกับแรงดันซึ่งเป็นรูปคลื่นไซน์ (Sine Wave) มากที่สุดที่เรียกว่าการปรับปรุ้ดัวประกอบกำลัง (Power Factor Correction) โดยใช้วิธีการสวิตซ์ ซึ่งวงจรที่นิยมใช้ได้แก่ วงจรแปลงผันแบบบูส (Boost Converter) แต่มีข้อจำกัดคือแรงดันด้านออกจะมีค่าสูงกว่าแรงดันด้านเข้า วงจรแปลงผันแบบบัค-บูส (Buck-Boost Converter) และวงจรแปลงผันแบบคุก (Cuk Converter) ซึ่งมีข้อเสียคือให้แรงดันด้านออกกลับขั้วกับแรงดันด้านเข้า ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวจึงเลือกใช้วงจรแปลงผันแบบซีพิก (Single Ended Primary Inductor Converter: SEPIC) ซึ่งมีข้อดีคือสามารถกำหนดแรงดันให้สูงหรือต่ำได้ในจังหวะเดียว (Single Stage) โดยใช้สวิตซ์เพียงตัวเดียว [6]

ในบทความนี้เป็นกรนำเสนอวิธีการควบคุมโดยใช้หลักการสมดุลกำลังไฟฟ้าในด้านการเข้าให้เท่ากับกำลังไฟฟ้าด้านออกมาประยุกต์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การควบคุมร่วมกับกระบวนการควบคุมแบบสไลด์คิงโหมด (Sliding Mode Control) เพื่อนำมาควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบซีพิกให้ทำงานในภาวะกระแสต่อเนื่อง (Continuous Conduction Mode: CCM) เพื่อลดปริมาณของฮาร์โมนิกกระแสด้าน และตัวประกอบกำลังให้มีความใกล้เคียงหนึ่ง

2. หลักการของวงจรแปลงผันแบบซีพิก

วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบซีพิกที่นำเสนอซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสลับ วงจรเรียงกระแส (Bridge Rectifier) และวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบซีพิกแบบมีหม้อแปลงคั่นแยก (Isolate) ทางไฟฟ้าง่ายรูปที่ 1



รูปที่ 1 วงจรแปลงผันไฟสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบซีพิก

2.1 การวิเคราะห์หาสมการแบบจำลองของวงจรแปลงผัน

จากรูปแบบสมการสเปซสถานะ (State Space) โดยทั่วไป [3] คือ

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

โดยกำหนดให้

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

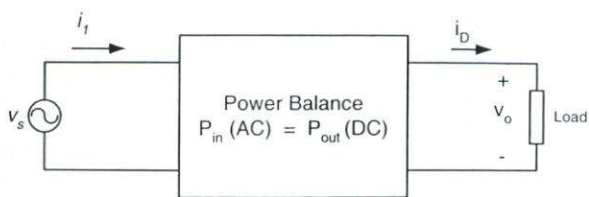
โดยที่ \mathbf{A} คือแมทริกซ์ของพารามิเตอร์ที่คิดค่าสถานะของสวิตช์ (Switch Status) \mathbf{u} \mathbf{B} คือเวกเตอร์ของพารามิเตอร์ที่คิดค่าสถานะของสวิตช์ และ \mathbf{F} คือเวกเตอร์ของพารามิเตอร์ที่มีเทอมของแหล่งจ่าย

เมื่อทำการโอนย้ายค่าพารามิเตอร์จากด้านทุติยภูมิไปไว้ด้านปฐมภูมิ จากนั้นหาค่าสมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสถานะกับพารามิเตอร์ของวงจรในสภาวะที่สวิตช์ปิด (Switch On) และสวิตช์เปิด (Switch Off) โดยวงจรทำงานแบบกระแสต่อเนื่อง ควบคุมการในสภาวะสวิตช์ปิดด้วย \mathbf{u} และ สภาวะสวิตช์เปิดด้วย $1 - \mathbf{u}$ จากนั้นนำสมการทั้งสองสภาวะมารวมกันจะได้รูปแบบตามสมการที่ (1) [3-4] ดังนี้

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

2.2 การออกแบบระบบควบคุม

2.2.1 หลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า พิจารณาจากกำลังไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้า เท่ากับกำลังไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกดังรูปที่ 2

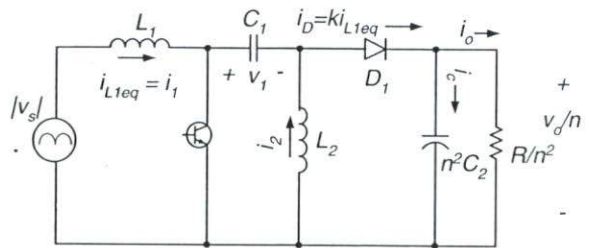


รูปที่ 2 การสมดุลกำลังไฟฟ้าด้านเข้ากับด้านออก

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

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

เมื่อ i_{Leq} คือกระแสสมมูลซึ่งไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 และเมื่อนำรูปที่ 1 มาพิจารณาบนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้าจะสามารถเขียนรูปใหม่ได้ดังรูปที่ 3 [7]



รูปที่ 3 วงจรแปลงผันเมื่อพิจารณาบนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า

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

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

โดยที่

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

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

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

เมื่อพิจารณากับวงจรแปลงผันดังรูปที่ 3 จะได้กระแส i_{Leq} ซึ่งจะนำไปคูณกับสัญญาณไซน์เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์ต่อไป

2.2.1 การควบคุมแบบสไลด์คิงโมด จากสมการที่ (3)

มีจำนวนตัวแปรสถานะที่จะต้องควบคุมตามวิธีการควบคุมแบบสไลด์คิงจำนวน 4 ตัวแปร โดยการกำหนดให้ สมการพื้นผิวสไลด์คิงเป็นผลรวมเชิงเส้น (Linear Combination) ของ error ตัวแปรสถานะ [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 ของตัวแปรสถานะ

เมื่อพิจารณาสมการที่ (8) จะเห็นว่าหากควบคุมทุกตัวแปรสถานะทำให้ต้องใช้อุปกรณ์วัดค่าสัญญาณหลายตัว ดังนั้นเพื่อให้การวิเคราะห์มีความง่ายขึ้นและใช้อุปกรณ์วัดค่าสัญญาณน้อยลงจึงมีการพิจารณาเงื่อนไขที่พอเพียงในสภาวะคงอยู่ของสไลด์คิงโมด [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) สามารถลดตัวแปรเพื่อที่จะลดอุปกรณ์ตรวจ
จับสัญญาณและจัดรูปใหม่ให้เหลือดังนี้

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

การหาค่า K_4 ทำได้โดยกำหนดสมการพื้นผิวสไลด์คิงเป็น

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

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)
จะได้สมการพื้นผิวสไลด์คิงเป็น

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

หาอนุพันธ์ของสมการที่ (15) จากเงื่อนไขของสถานะคงอยู่และกฎการสวิตช์
ของวิธีสไลด์คิง โมด [2-3] โดยนำค่าในตัวแปรสเคทที่ปรากฏของสมการที่ (3)
มาแทนค่าอีกครั้ง [6]

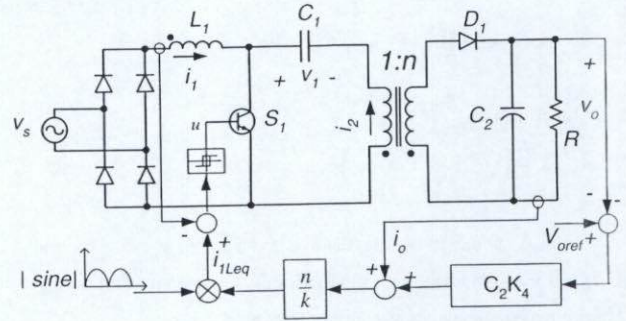
เมื่อระบบอยู่ในสถานะสมดุลสมการพื้นผิวสไลด์คิงจะเป็นดังสมการที่ (12)
จึงสามารถหาค่าอนุพันธ์ของ v_o ได้ดังนี้

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

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) สามารถนำไปสร้างแบบจำลองการควบคุมและออกแบบ
วงจรถวลคุมดังรูปที่ 4

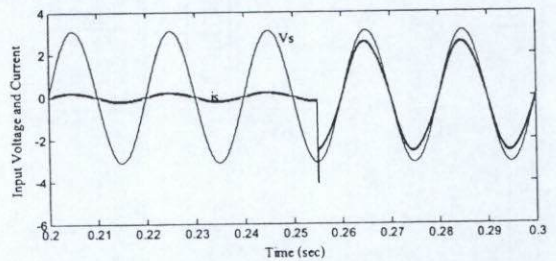


รูปที่ 4 การควบคุมวงจรถวลคุมไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้าตรงแบบ
ซีพิก โดยประยุกต์ใช้หลักการสมมูลกำลังไฟฟ้า

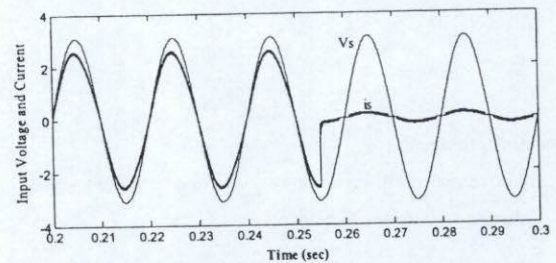
5. การจำลองการทำงาน

จากรูปที่ 4 จะถูกนำไปสร้างแบบจำลองเพื่อทดสอบการควบคุม
โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้ คือ $V_s = 220$ V, $L_1 = 6$ mH, $L_2 = 1.5$ mH, $f_s = 50$ Hz, $C_1 =$
 0.44 μ F, $C_2 = 20400$ μ F, $V_o = 48$ V, $k = 4.10$, $K_4 = 50$, $P_{o(max)} = 500$ W, $P_{o(min)} =$
 50 W, $n = 1$

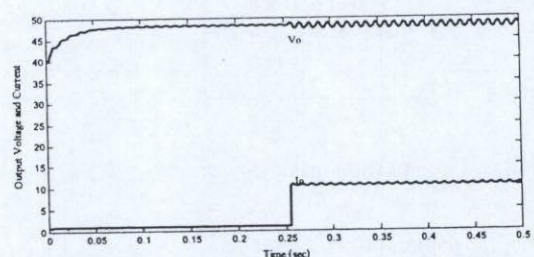
จากการจำลองการทำงานโดยการเปลี่ยนภาระจาก 50 W เป็น 500 W
และในทางกลับกัน พบว่าระบบสามารถควบคุมให้กระแสด้านเข้าเป็นรูปคลื่นไซน์
ได้อย่างรวดเร็ว โดยผลตอบสนองของแรงดันและกระแสด้านเข้าดังรูปที่ 5 และ 6 ส่วน
แรงดันและกระแสด้านออกดังรูปที่ 7 และ 8 ตามลำดับ



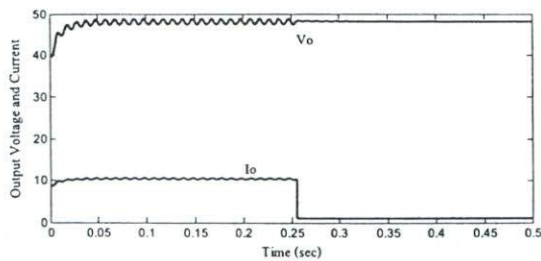
รูปที่ 5 แรงดันและกระแสด้านเข้าขณะเปลี่ยนภาระจาก 50 W เป็น 500 W



รูปที่ 6 แรงดันและกระแสด้านเข้าขณะเปลี่ยนภาระจาก 500 W เป็น 50 W



รูปที่ 7 แรงดันและกระแสด้านออกขณะเปลี่ยนภาระ 50 W เป็น 500 W



รูปที่ 8 แรงดันและกระแสด้านออกขณะเปลี่ยนภาระ 500 W เป็น 50 W

6. สรุป

การออกแบบระบบควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบซิงคิก เพื่อควบคุมตัวประกอบกำลังของไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้าให้ใกล้เคียงหนึ่งและควบคุมแรงดันไฟตรงขาออกให้คงที่ โดยการประยุกต์ใช้หลักการสมมูลกำลังไฟฟ้าร่วมกับและวิธีสไลด์คิงโหมดกับนั้น จากผลการจำลองการทำงานพบว่าระบบมีความสามารถตอบสนององสภาวะการเปลี่ยนแปลงของภาระได้ดี และจากรูปคลื่นกระแสและแรงดันด้านเข้าพบว่าระบบสามารถควบคุมวงจรแปลงผันให้มีความตัวประกอบกำลังให้มีความใกล้เคียงหนึ่งได้

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, "ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์โมนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม" การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, PRC-PQG- 01, 1998.
- [6] ประหยัด กองสุข, "การวิเคราะห์และออกแบบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบ SEPIC ที่มีค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง โดยประยุกต์ใช้วิธีการควบคุมแบบสไลด์คิง," วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2546.