

การออกแบบและวิเคราะห์ของวงจรทระดับแรงดันแบบดวลล์ สำหรับระบบพลังงานทดแทน

Design and Analysis of Dual Boost Converter for Renewable Energy System

ศุภวัฒน์ คำทิพย์ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์

ศูนย์วิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ 1 ต. คลองหก อ. ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

โทรศัพท์: +66(2)-549-3571 โทรสาร: +66(2)-549-3422 E-mail: krischonme.b@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

การออกแบบ และวิเคราะห์วงจรทระดับแรงดันแบบดวลล์สำหรับพลังงานทดแทน ใช้สำหรับกังหันลมและพลังงานแสงอาทิตย์ การควบคุมได้มีการประยุกต์ความถี่สูงและแปลงพลังงานกระแสตรงเป็นกระแสตรง วงจรทระดับแรงดันจะประกอบด้วยขดลวดเหนี่ยวนำจำนวน 2 ชุด ผลของการทดลองแสดงแรงดันด้านออก 600 โวลท์วงจรทระดับแรงดันสามารถรับแรงดันต่ำจากการผลิตของกังหันลมและพลังงานแสงอาทิตย์ ในภาคปฏิบัติของวงจรทระดับแรงดันในการออกแบบและการวิเคราะห์ วงจรทระดับแรงดันขนาดพิกัดกำลัง 1000 วัตต์ได้มีการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจ

คำสำคัญ: วงจรทระดับแรงดันแบบดวลล์, พลังงานทดแทน

1. บทนำ

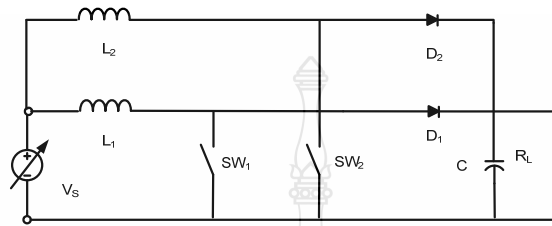
ความต้องการในการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้น การศึกษาการทำงานของวงจร ก่อนที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับระบบการทำงานจริง ได้มีการใช้งานวงจรทระดับแรงดันแบบ 1 เฟสซึ่งในการทำงานยังไม่ครอบคลุมช่วงแรงดันขาออกของแหล่งจ่ายไม่คงที่ดังนั้นในวิเคราะห์วงจรทระดับแรงดันแบบดวลล์สำหรับพลังงานทดแทนนี้ได้นำข้อเสียนำมาปรับปรุงให้ดีขึ้น ในปัจจุบันในการแก้ปัญหาการเกิด แรงดันเกินชั่วคราว เพื่อส่งจ่ายให้กับระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ยังไม่มีหลายเทคนิคดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบ มาช่วยในการจ่ายกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเสริมให้กับระบบได้

[1],[2]ได้มีการใช้เทคนิคควบคุมแบบ PI สำหรับวงจรทระดับแรงดันแบบหนึ่งเฟส ข้อดีก็คือสามารถปรับค่า PI ด้วยตัวเองข้อเสีย ระบบยังช้าในการตอบสนอง [2]ได้มีการใช้เทคนิคควบคุมแบบ PI สำหรับวงจรทระดับแรงดันแบบหนึ่งเฟสใช้สำหรับ PV [3]เป็นการวิเคราะห์ช่วงการควบคุมกระแสไม่ต่อเนื่องของวงจรทระดับแรงดัน ข้อดีเป็นการวิเคราะห์ช่วงกระแสไม่ต่อเนื่องซึ่งแสดงเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ แต่ก็ยังมีปัญหาในสภาวะแรงดันเกินชั่วคราว [4]แรงดันด้านเข้าจะอยู่ในช่วง 48 ~ 60 โวลท์ แต่ช่วงแรงดันยังไม่เหมาะสมกับระบบพลังงานทดแทน [5]วิเคราะห์สถานะคงตัวของวงจรทระดับแรงดัน [6]ใช้เทคนิคH infinity ในการลดสภาวะชั่วขณะ แต่เทคนิค ยังไม่เหมาะสมกับพลังงานทดแทน [7]การวิเคราะห์สัญญาณขนาดเล็กของวงจรทระดับแรงดันแต่จะกล่าวถึงการแก้ตัวประกอบกำลังของวงจร

ส่วนประกอบของบทความของแต่ละส่วนจะประกอบด้วย 5 ส่วน ส่วนแรกกล่าวถึงบทนำจะกล่าวถึงภาพโดยรวมของบทความ ส่วนที่ 2 จะอธิบายหลักการทำงานของวงจร แต่ละสถานะของวงจรทระดับแรงดันรวมกล่าวถึงฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรทระดับแรงดันแบบดวลล์ ส่วนที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบแต่ละส่วนของวงจร ซึ่งค่าที่ได้จากการออกแบบเป็นตัวกำหนดค่าต่างๆของวงจร ส่วนที่ 4 เป็นผลที่ได้จากการวัดค่าสัญญาณแต่ละส่วนของวงจร ส่วนที่ 5 เป็นการสรุปผลที่ได้จากการทำงานของวงจร

2. วงจรทบทระดับแรงดันแบบคู่อัล(Dual Boost Converter)

วงจรทบทระดับแรงดันแบบคู่อัลเป็นวงจรควบคุมระดับแรงดันให้สูงกว่าระดับแรงดันจากแหล่งจ่ายด้านเข้า โดยมีความสามารถมากกว่าวงจรทบทระดับขั้นเดียวซึ่งมีปัญหาเกี่ยวกับอัตราการเพิ่มระดับแรงดันได้สูงจากแรงดันด้านเข้าประมาณ 2-3 เท่า ทำให้แรงดันด้านออกมีเสถียรภาพ ดังนั้นการออกแบบวิธีควบคุมแรงดันจึงมีความสำคัญและจำเป็นต้องศึกษาอย่างละเอียด ระบบที่ผ่านมามีการควบคุมหลากหลายวิธี ในบทความนี้จะเสนอการควบคุมที่มีการวิเคราะห์สัญญาณขนาดเล็กเพื่อหาข้อดีร้ายของการควบคุมแบบ PI ที่มีความถูกต้องที่สุด ทำให้การควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกให้คงที่ และลดกระแสไหลวนในระบบแหล่งจ่ายเนื่องจากแรงดันด้านออกของแต่ละแหล่งจ่ายนั้นมีค่าระลอกของแรงดันน้อยทำให้ระบบเกิดการสูญเสียต่ำ



รูปที่ 1 วงจรทบทระดับแรงดันแบบคู่อัลบูส

รูปที่ 1 แสดงวงจรทบทระดับแบบคู่อัลซึ่งใช้สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 2 ตัว ทำงานที่ความถี่ 20 kHz องค์ประกอบและพารามิเตอร์ของวงจรถูกออกแบบบนพื้นฐานรับพลังงานจากแหล่งพลังงานทดแทน จำเป็นต้องมีรู้สถานะ การทำงานของวงจรในแต่ละช่วงเวลา ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$G = K_1 G_{ON} + K_2 G_{OFF} \quad (1)$$

วงจรทบทระดับแรงดันแบบคู่อัลอย่างง่าย ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์หลักของวงจรทบทระดับแรงดันมี ตัวเหนี่ยวนำ ไดโอด อุปกรณ์การสวิตช์ คาปาซิเตอร์ และโหลดทางด้านไฟฟ้า ดังนั้นเราสามารถแสดงเป็นสมการพลวัตในระหว่างที่อุปกรณ์การสวิตช์ T_{on} และ T_{off} ได้ดังนี้

$$\dot{X}_1 = A_1 x_1 + b_1 \quad (2)$$

$$\text{เมื่อ } A_1 = \begin{bmatrix} -R_L / L & 0 \\ 0 & -1 / RC \end{bmatrix} \quad b_1 = \begin{bmatrix} V_s / L \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} -R_L / L & -1 / L \\ 1 / C & -1 / RC \end{bmatrix} \quad b_2 = \begin{bmatrix} V_s / L \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

และ

$$x_1 = \begin{bmatrix} i_1 \\ v_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

จากสมการจัดรูปแบบสมการใหม่ เมื่อ $u=1$ อยู่ในช่วง T_{on} และ $u=0$ อยู่ในช่วง T_{off} ได้ดังนี้

$$\dot{x}_1 = (A_1 x_1 + b_1)u + (A_2 x_1 + b_2)(1-u) \quad (6)$$

$$\dot{x}_1 = A_2 x_1 + b_2 + (A_1 - A_2) X_1 u + (b_1 - b_2)u \quad (7)$$

เมื่อ K_1 และ K_2 คือ โหมดการทำงานของวงจรทบทระดับแบบคู่อัล

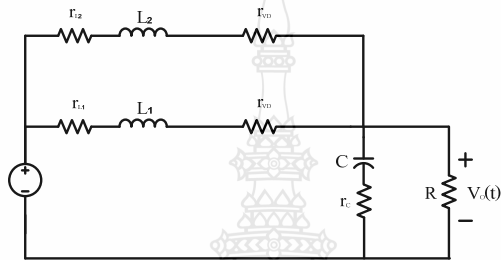
$$K_1 = \begin{cases} 1, & 0 < t < t_{on}, \\ 0 & t_{on} < t \leq T, \end{cases} \quad (8)$$

$$K_2 = \begin{cases} 0, & 0 < t < t_{on}, \\ 1 & t_{on} < t \leq T, \end{cases} \quad (9)$$

สามารถอธิบายและวิเคราะห์วงจรสมมูลในสถานะ ON และ OFF ได้ดังต่อไปนี้

2.1 สภาวะสวิตช์เปิดวงจร

รูปที่ 2 แสดงแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของวงจรทระดับแบบดิวอี้ลในสถานะสวิตช์เปิดวงจร การวิเคราะห์เพื่อหาแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของวงจรทระดับแรงดันแบบดิวอี้ลจะเห็นว่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองตัวจะไหลไปที่โหลด สามารถแสดงสมการสภาวะนี้ได้ดังสมการที่ (10) ถึง (12)



รูปที่ 2 สภาวะสวิตช์เปิดวงจรของวงจรทระดับแรงดัน

$$L \frac{d}{dt} i_L(t) = v_s(t) - 2 \left(r_L + r_{sw} + \frac{R r_c}{R + r_c} \right) i_L(t) - \frac{R}{R + r_c} v_c(t) \quad (10)$$

$$\frac{d}{dt} v_c(t) = \frac{1}{C(R + r_c)} (R i_L(t) - v_c(t)) \quad (11)$$

$$v_o(t) = \frac{R}{R + r_c} (v_c(t) + 2 r_c i_L(t)) \quad (12)$$

2.2 สภาวะสวิตช์ปิดวงจร (On state operation)

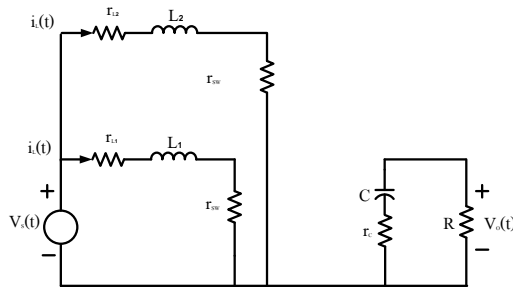
รูปที่ 3 แสดงแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของวงจรทระดับแบบดิวอี้ลในสถานะสวิตช์ปิดวงจร จะเห็นว่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองตัวจะไหลผ่านสวิตช์ทำให้ไม่มีกระแสจากแหล่งจ่ายไหลไปที่โหลด สามารถแสดงสมการสภาวะนี้ได้ดังสมการที่ (13) ถึง (15)

$$L \frac{d}{dt} i_L(t) = v_s(t) - 2((r_L + r_{sw}) i_L(t)) \quad (13)$$

$$\frac{d}{dt} v_c(t) = -\frac{1}{C(R + r_c)} v_c(t) \quad (14)$$

$$v_o(t) = \frac{R}{R + r_c} v_c(t) \quad (15)$$

เมื่อสวิตช์ปิดวงจรจะมีกระแสไหลผ่าน L_1 และ L_2 และผ่านความต้านทานภายใน และ L_1, L_2 เก็บพลังงานเส้นแรงแม่เหล็ก



รูปที่ 3 สภาวะสวิตช์เปิดวงจรของวงจรทระดับแรงดัน

2.3 ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรทระดับแรงดันแบบคูอัล

สมการของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรทระดับแรงดันแบบคูอัลของรูปปิดของวงจร T_c คือตัวควบคุมฟังก์ชันถ่ายโอน β คือฟังก์ชันถ่ายโอน T_p คือสัญญาณขนาดเล็กต่อสัญญาณฟังก์ชันถ่ายโอนด้านนอก T_m คือแรงดันของฟังก์ชันถ่ายโอนของ PWM

$$T_m(s) = \frac{1}{V_m}, \quad (16)$$

เมื่อ V_m คือค่าสูงสุดของสัญญาณสามเหลี่ยมรวมกับสัญญาณสามเหลี่ยม

$$T_{ol}(s) = \frac{\hat{V}_f(s)}{\hat{V}_e(s)} \Big|_{v_g(s)=0} = \beta T_c(s) T_m(s) T_p(s), \quad (17)$$

สมการ(11)รูปเปิด

$$T_{ol}(s) = \frac{\beta AB}{V_m} \frac{(s+z_1)(s+z_2)(s+z_3)}{s(s+p_1)(s+p_2)[s^2+k_{d1}s+k_{d0}]} \quad (18)$$

สมการ(13)รูปปิด โดยการควบคุมฟังก์ชันถ่ายโอน

$$T_{cl}(s) = \frac{\hat{V}_o(s)}{\hat{V}_r(s)} \Big|_{v_g(s)=0} = \frac{T_c(s) T_m(s) T_p(s)}{(1 + \beta T_c(s) T_m(s) T_p(s))} \quad (19)$$

สมการ(14)รูปปิดโดยการแทนค่าใน T_{cl}

$$T_{cl}(s) = \frac{T_{ol}(s)}{\beta(1 + T_{ol}(s))} \quad (20)$$

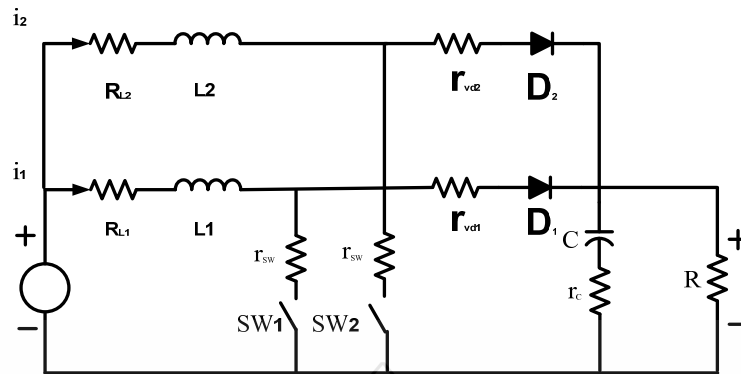
สมการที่(15)ควบคุมฟังก์ชันถ่ายโอนทั้งหมด

$$T_{cl}(s) = \frac{AB}{V_m} \frac{(s+z_1)(s+z_2)(s+z_3)}{s(s+p_1)(s+p_2)(s^2+k_{d1}s+k_{d0}) + \frac{\beta AB}{V_m} (s+z_1)(s+z_2)(s+z_3)} \quad (21)$$

3. การออกแบบวงจร

เนื่องจากแหล่งจ่ายแต่ละตัวมีระดับแรงดันที่ต่ำและมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาส่งผลให้แรงดันออกมีการเปลี่ยนแปลง จึงต้องมีการใช้วงจรทระดับแรงดันเพื่อยกระดับแรงดันด้านนอก เพื่อให้เป็นไปตามความต้องการดังนั้นการควบคุมระดับแรงดันด้านนอกให้คงที่จึงต้องมีความจำเป็น ซึ่งจะต้องทำการวิเคราะห์สัญญาณขนาดเล็กของวงจรทระดับแรงดันเพื่อหาสมการคณิตศาสตร์

จากรูปที่ 4 จำเป็นต้องวิเคราะห์ด้วยสัญญาณขนาดเล็กเพื่อหาค่าเฉลี่ยของสมการใกล้เคียงกับภาคปฏิบัติมากที่สุด โดยจะคิดค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นนั้นด้วย



รูปที่ 4 วงจรทบทระดับแบบมีการสูญเสีย

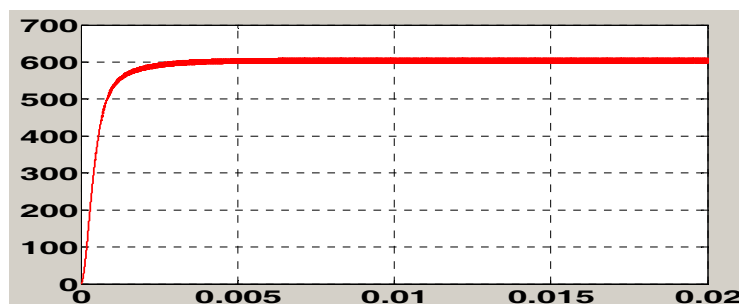
ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองการทำงาน

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ
แรงดันด้านเข้า	210-230 V
แรงดันด้านออก	600 V
กำลังด้านออก	1,000 W
ความถี่ในการสวิตช์	20 kHz
ค่าระลอกของแรงดัน	5% ของแรงดันด้านออก
ค่าระลอกของกระแส	10% ของกระแสตัวเหนี่ยวนำ
ค่าตัวเหนี่ยวนำ	11735 μ H
ค่าตัวเก็บประจุ	114 μ F

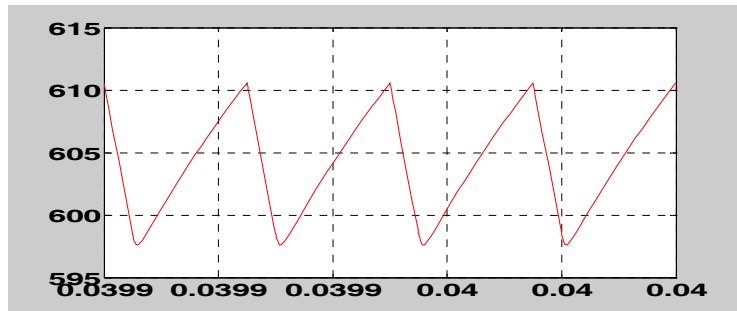
4. ผลการทดลอง

ผลการทดลองของระบบจะใช้พารามิเตอร์ดังแสดงตามตารางที่ 1 โดยกำหนดแรงดันด้านออกมีค่าเท่ากับ 600 V เพื่อเตรียมจ่ายให้กับระบบ

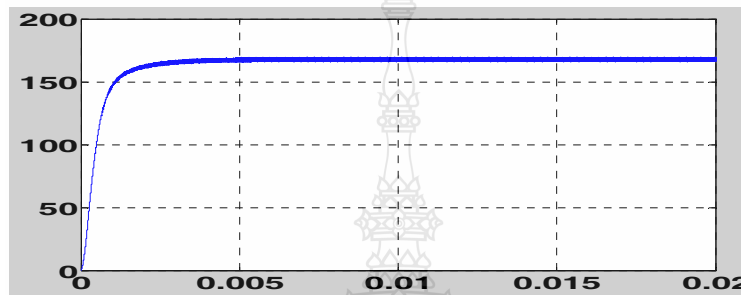
แรงดันด้านออกของวงจรทบทระดับแรงดันที่สามารถควบคุมให้มีค่าระดับแรงดันเท่ากับ 600 V อย่างรวดเร็ว โดยใช้หลักการควบคุมกระแส จะเห็นได้ว่าเมื่อเรากำหนดให้แรงดันด้านเข้าคงที่ ซึ่งหมายถึงแรงดันที่ออกจากแหล่งจ่ายมีค่าคงที่ ระบบสามารถควบคุมแรงดันด้านออกให้เท่ากับ 600 V ได้ จากผลดังกล่าวทำให้ตัวที่ไซเคิลในการขับนำสวิตช์ไม่เปลี่ยนแปลง ประสิทธิภาพของวงจรมีค่าคงที่ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งมีค่าตัวที่ไซเคิลอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ คือไม่เกิน 10 %



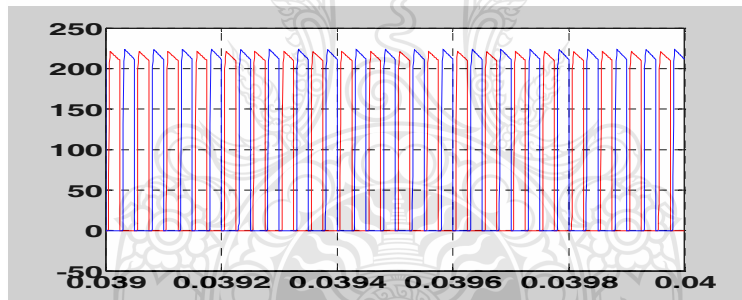
รูปที่ 5 แรงดันด้านออก



รูปที่ 6 ขยายสัญญาณของแรงดันด้านออก



รูปที่ 7 กระแสด้านออก



รูปที่ 8 กระแสด้าน L_1 , L_2

5. สรุป

บทความนี้เสนอผลการทดลองและการออกแบบและวิเคราะห์ของวงจรระดับแรงดันแบบดูอัลสำหรับระบบพลังงานทดแทน สามารถควบคุมแรงดันขาออกให้คงที่ ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพดีขึ้นและสามารถที่จะส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพจากการทดลองโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์จะเห็นว่าแรงดันขาออกที่ได้เป็นสัญญาณแรงดันที่สามารถควบคุมให้

คงที่ได้ที่ประมาณ 600 V แต่จะมีการแกว่งและสูญเสียพลังงานไปภายในระบบเล็กน้อย ซึ่งความสูญเสียนั้นก็ยังสามารถที่จะปรับปรุงให้มีค่าเล็กน้อย โดยสามารถที่จะส่งจ่ายให้กับระบบได้ สามารถที่จะพัฒนาและประยุกต์ได้จริงในอนาคต

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้จะไม่สำเร็จไม่ได้ถ้าขาดทุนทรัพย์และกำลัง ดังนั้นผู้แต่งจึงขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่ใช้ทุนอุดหนุนงานวิจัย งบประมาณประจำปี 2552 และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่ให้สถานที่ทำงานและสถานที่ทำวิจัยตลอดมาหลายปี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Hasall JGmiirciigil, A PI-Type Self-Tuning Fuzzy Controller for Dc-Dc Boost Converters The 30th Annual Conference of the iEEE industrial Electronics Society, November 2 - 6,2004, Busan, Korea
- [2] V.D.Yurkevich, G.S.Zinovievy IFOST2008 PI Controller Design via Singular Perturbation Technique for AC-AC Buck-Boost Converter
- [3] Mummadi Veerachary, Tomonobu Senj yu, and Katsumi MODELING AND ANALYSIS OF INTERLEAVED DUAL BOOST CONVERTER Uezato Faculty of Engineering, University of the Ryukyus 1 Senbaru, Nishihara-cho, Okinawa 903-02 13, JAPAN
- [4] Heinz van der Broeck, Ibrahim Tezcan 1 KW Dual Interleaved Boost Converter for Low Voltage Applications Power Electronics and Motion Control Conference, 2006. IPEMC 2006. CES/IEEE 5th International
- [5] Po-Wa Lee, Member, IEEE, Yim-Shu Lee, Senior Member, IEEE, David K.W. Cheng, Member, IEEE, and Xiu-Cheng Liu Steady-State Analysis of an Interleaved Boost Converter with Coupled Inductors Industrial Electronics, IEEE Transactions on Volume: 47 , Issue: 4 Digital Object Identifier: 10.1109/41.857959 Publication Year: 2000 , Page(s): 787 – 795
- [6] Cheng Gong Baoku Su Robust H^∞ Control for Discrete Time-Delay Fuzzy Systems Mechatronics and Automation, 2007. ICMA 2007. International Conference on Digital Object Identifier: 10.1109/ICMA.2007.4303709 Publication Year: 2007 , Page(s): 1141 - 1147 IEEE Conferences
- [7] Kanaan, H.Y.; Sauriol, G.; Al-Haddad, K.; Small-signal modelling and linear control of a high efficiency dual boost single-phase power factor correction circuit Power Electronics, IET Volume: 2 , Issue: 6 Digital Object Identifier: 10.1049/iet-pel.2008.0286 Publication Year: 2009 , Page(s): 665 - 674

