

การออกแบบและจำลองการมอดูเลตแบบเดลต้าสำหรับควบคุมวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ Design and Simulation of Delta Modulation Control for Buck Converter

บัญชา หิรัญสิงห์¹, บุญธง วสุริย์² และ อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ³

¹สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
²สาขาวิชาอุตสาหกรรมศิลป์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
³สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
¹hirunsing@yahoo.com ²wasuribt@gmail.com and ³kjanuwat@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและจำลองการมอดูเลตแบบเดลต้าสำหรับควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงหรือวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ โดยใช้โปรแกรม PSpice ข้อดีของการมอดูเลตแบบนี้คือสามารถลดค่ายอดของสัญญาณที่ความถี่สวิตชิ่งซึ่งมีค่าลดลงและสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI) จะควบคุมได้ง่ายกว่าที่ความถี่สูง ในบทความวิจัยนี้จะสร้างสัญญาณที่ดับเบิ้ลยูเอ็มจากการมอดูเลตแบบเดลต้าอย่างง่ายโดยใช้โอปแอมป์เพื่อสร้างสัญญาณพาห้ซิมิตต์ริกเกอร์แล้วป้อนกลับเข้ากับตัวอินทิเกรเตอร์ผ่านตัวเปรียบเทียบสัญญาณ ซึ่งถ้าหากสัญญาณมากกว่าหรือน้อยกว่าขอบเขตฮิสเทอรีซิส $\pm HB$ สัญญาณที่ดับเบิ้ลยูเอ็มจะเปลี่ยนสถานะ ส่วนสัญญาณที่ดับเบิ้ลยูเอ็มที่ได้จะต่อผ่านวงจรชั้เกท แล้วนำไปขับวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ ที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้าด้านเอาต์พุต 200 W ที่แรงดันอินพุต 100 V จากการจำลองพบว่าวงจรตอบสนองต่อระบบควบคุมได้ดี

คำสำคัญ: การมอดูเลตแบบเดลต้า, วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

Abstract

This article presents the design and simulation of delta modulation control for buck converter by PSpice simulation program. The advantage of this technique can reduce the peak signal of switching frequency and easily control electromagnetics interference (EMI) at high frequency. This article also describes the construction of pulse width modulation (PWM) delta modulation (DM) signal by using operational amplifier (Op-amp). The carrier schmitt trigger signal is fed to integrator and compare with reference signal. If the carrier signal is greater or smaller than the reference, hysteresis voltage boundary $\pm HB$ is provided. That signal is called PWM-DM is used to drive a gate of switch in the buck converter which can operate 200 W at rated output power with 100 V input voltage. The output waveforms also show a good response by simulation.

Keywords: Delta modulation, Buck converter

1. บทนำ

ปัจจุบันมีการนำวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาใช้ในชีวิตประจำวันอย่างแพร่หลายเช่น อุปกรณ์ชาร์จแบตเตอรี่ อุปกรณ์ขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เป็นต้น เหตุผลสำคัญก็เพื่อให้อุปกรณ์นั้น ๆ มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (dc power supply) ก็เป็นอีกสิ่งหนึ่งที่ได้มีการนำวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาใช้ เพราะให้ประสิทธิภาพที่สูงขนาดเล็ก น้ำหนักเบา การออกแบบวงจรให้ได้ประสิทธิภาพดี และราคาถูก จึงเป็นสิ่งสำคัญในการแข่งขันทางการตลาด การ

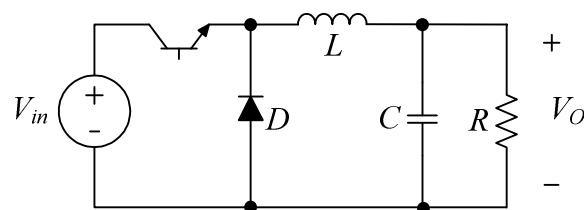
เลือกอุปกรณ์สวิตชิง (switching device) [1]-[3] ถือเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดราคาของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เนื่องจากอุปกรณ์สวิตชิงมีราคาค่อนข้างแพงเมื่อเทียบกับชิ้นส่วนอื่น ๆ ผู้ออกแบบวงจรที่มีอุปกรณ์สวิตชิง จึงพยายามใช้ อุปกรณ์สวิตชิงที่สามารถรับพิกัดแรงดันที่ไม่สูงเกินไป เนื่องจากพิกัดแรงดันที่สูงขึ้นจะทำให้ราคาของต้นทุนสูงขึ้นมาก เมื่อเทียบกับพิกัดกระแสที่สูงขึ้น ดังนั้นหากสามารถลดพิกัดแรงดันของอุปกรณ์สวิตชิงได้มาก ต้นทุนรวมของวงจรก็จะมีค่าต่ำลง เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงส่วนมาก จะเป็นการแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าให้ต่ำลง เนื่องจากไฟฟ้าที่ใช้ตามบ้านนั้นเป็นไฟฟ้า กระแสสลับแรงดัน 220 V 50 Hz เมื่อแปลงเป็นกระแสตรงจะได้แรงดันไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 310 V แต่ในการใช้งานโดยปกติ นั้น จะใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ค่อนข้างต่ำ เนื่องจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่วนมากมักจะใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำ ดังนั้น วงจรลดระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงหรือวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ (buck converter) จึงมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย แต่ ปัญหาส่วนมากของวงจรที่พบคือ ค่าขดของสัญญาณที่ดับเบิลยูเอ็มทีความถี่สวิตชิงให้มีความถี่สูง และค่าขดของรูปคลื่นกระแส และแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสวิตชิงที่มีความถี่สวิตชิงให้มีความถี่สูง ตลอดจนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI) ควบคุมได้ยากที่ความถี่สูง

จากปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการนำเสนอบทความวิจัยการออกแบบและจำลองการมอดูเลตแบบเดลต้าสำหรับควบคุม วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงหรือวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งข้อดีของการมอดูเลตแบบนี้คือ สามารถลดค่าขดของสัญญาณที่ความถี่สวิตชิงให้มีความถี่ลดลงและสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า จะควบคุมได้ง่ายกว่าที่ความถี่สูง โดยในบทความวิจัยจะสร้างสัญญาณที่ดับเบิลยูเอ็มทีจากการมอดูเลตแบบเดลต้าอย่างง่ายโดยใช้ซอฟต์แวร์ ในบทความวิจัยนี้จำลองระบบโดยใช้โปรแกรม Pspice

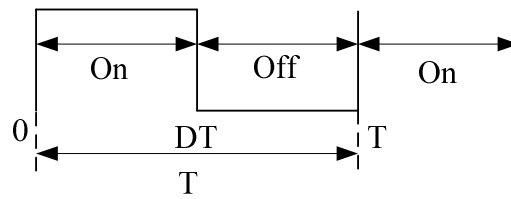
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์เป็นวงจรที่ทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตมีค่าต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุต ประกอบด้วย ตัวเหนี่ยวนำเป็นตัวเก็บพลังงาน เพื่อจ่ายในช่วงเวลาที่สวิตชิงหยุดนำกระแส ซึ่งกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำจะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น เมื่อสวิตชิ่งนำกระแส ตัวเก็บประจุซึ่งต่ออยู่กับโหลดเป็นตัวลดแรงดันกระแสเฟืองที่ขาออก ไดโอดต่ออยู่กับตัวเหนี่ยวนำ เพื่อ กำหนดทิศทางให้กระแสไหลผ่านในขณะที่สวิตชิงหยุดนำกระแส ในช่วงนี้กระแสที่ตัวเหนี่ยวนำจะลดลง การต่อโหลด ไดโอด และตัวเก็บประจุต่อเข้ากับกราวด์ของระบบ ทำให้ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมสวิตชิงในขณะที่สวิตชิงหยุดนำกระแสมีค่าสูงเท่ากับ ความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อให้แรงดันด้านเอาต์พุตมีความเป็นกระแสตรงมากขึ้นยิ่งขึ้นจะนิยมใช้ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (low pass filter) [9] แสดงดังรูปภาพที่ 1 การวิเคราะห์การทำงานของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ ในช่วงที่เป็นสภาวะอยู่ตัว (steady state) โดยจะเริ่มจากเงื่อนไขที่ว่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละ คาบเวลามีค่าเท่ากับศูนย์ ส่วนรูปภาพที่ 2 แสดงรูปคลื่นสัญญาณการสวิตชิง



รูปภาพที่ 1 วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์



รูปภาพที่ 2 รูปคลื่นสัญญาณการสวิตช์

การวิเคราะห์ห้วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ในสภาวะอยู่ตัว จะได้อัตราขยายแรงดันดังสมการที่ (1)

$$\frac{V_o}{V_{in}} = D \quad (1)$$

นอกจากนี้สามารถหาค่าอัตราระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุต ดังสมการที่ (2)

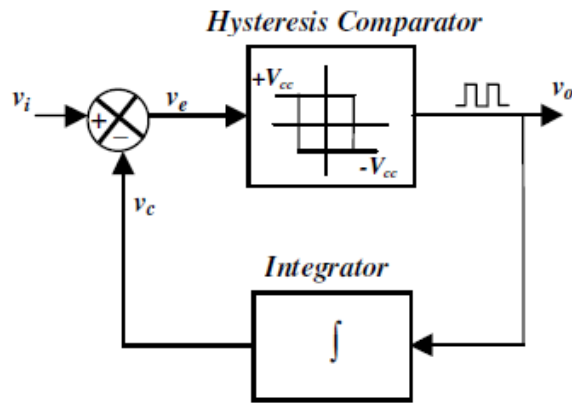
$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1-D}{8LCf^2} \quad (2)$$

และค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดที่ทำให้วงจรทำงานในโหมดนำกระแสต่อเนื่อง ดังสมการที่ (3)

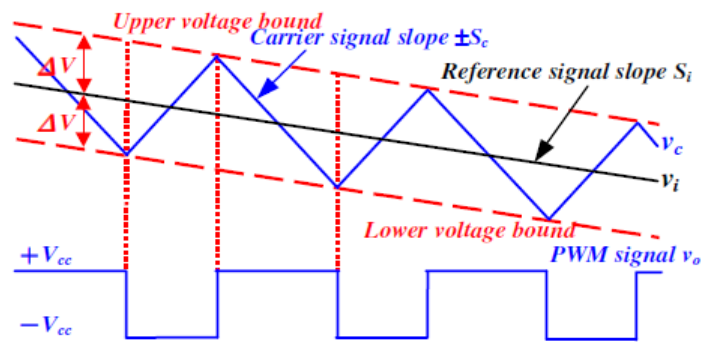
$$L_{\min} = \frac{(1-D)R}{2f} \quad (3)$$

2.2 การมอดูเลตแบบเดลต้า

เทคนิคการมอดูเลตแบบเดลต้าเหมาะสำหรับใช้ควบคุมอินเวอร์เตอร์และซิมมูเลเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ที่ต้องการเส้นแรงแม่เหล็กคงที่เช่น การปรับให้ได้แรงดันต่อความถี่ตามต้องการ นอกจากนี้ข้อดีอีกอย่างของเทคนิคนี้คือการลดค่ายอดของสัญญาณที่ความถี่สวิตช์ซึ่งมีค่าลดลง และสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI) จะควบคุมได้ง่ายกว่าที่ความถี่สูง [1], [6] แต่ในบทความนี้เป็นการนำเทคนิคการมอดูเลตแบบเดลต้ามาประยุกต์ใช้ควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงชนิดบัคคอนเวอร์เตอร์ บล็อกไดอะแกรมการมอดูเลตแบบเดลต้าแสดงในรูปภาพที่ 3 ประกอบด้วยสองส่วนสำคัญคือตัวเปรียบเทียบฮิสเทอรีซิส (hysteresis comparator) และตัวอินทิเกรเตอร์ [4]-[8] ซึ่งสัญญาณอินพุตอ้างอิง v_i ถูกนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณป้อนกลับหรือสัญญาณพาหะ v_c อยู่ในขอบเขตฮิสเทอรีซิส $\pm HB$ ซึ่งหากมากกว่าหรือน้อยกว่า $\pm HB$ สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มจะเปลี่ยนสถานะ สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม v_o แสดงในรูปภาพที่ 4



รูปภาพที่ 3 ระบบการมอดูเลตแบบเดลต้า



รูปภาพที่ 4 รูปคลื่นสัญญาณการมอดูเลตแบบเดลต้า

จากรูปคลื่นตั้งรูปภาพที่ 4 ความถี่สวิตช์และดิวิตซ์ไซเคิลของการมอดูเลตแบบเดลต้า ซึ่งขึ้นอยู่กับขอบเขตฮิสเตอร์ซิส Δv ความชันของสัญญาณพาหะ S_c และความชันของสัญญาณอ้างอิง S_i สามารถหาค่าได้ดังนี้ [6]

$$f_s = \frac{S_c^2 - S_i^2}{4\Delta v \cdot S_c} \tag{5}$$

$$D = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{S_i}{S_c} \right) \tag{6}$$

ถ้าสัญญาณอ้างอิง S_i เป็นสัญญาณรายคาบไซน์ สัญญาณอินพุต v_i จะเขียนได้เป็น

$$v_i = V_m \sin \omega t \tag{7}$$

เมื่อ V_m คือแอมพลิจูด หน่วยเป็นโวลต์

ω คือความถี่เชิงมุม หน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที

ถ้าทำการอนุพันธ์สมการที่ (7) ทำให้ได้ค่าความชันของสัญญาณอ้างอิงอินพุตไซน์ ดังสมการ

$$S_i = \omega V_m \cos \omega t \tag{8}$$

และความชันของสัญญาณพาหะแสดงได้ดังสมการ

$$S_c = \frac{v_o}{RC} = \frac{\pm V_{CC}}{\tau} \quad (9)$$

เมื่อ V_{CC} คือแรงดันแหล่งจ่าย

τ คือค่าคงที่เวลาของตัวอินทิเกรเตอร์

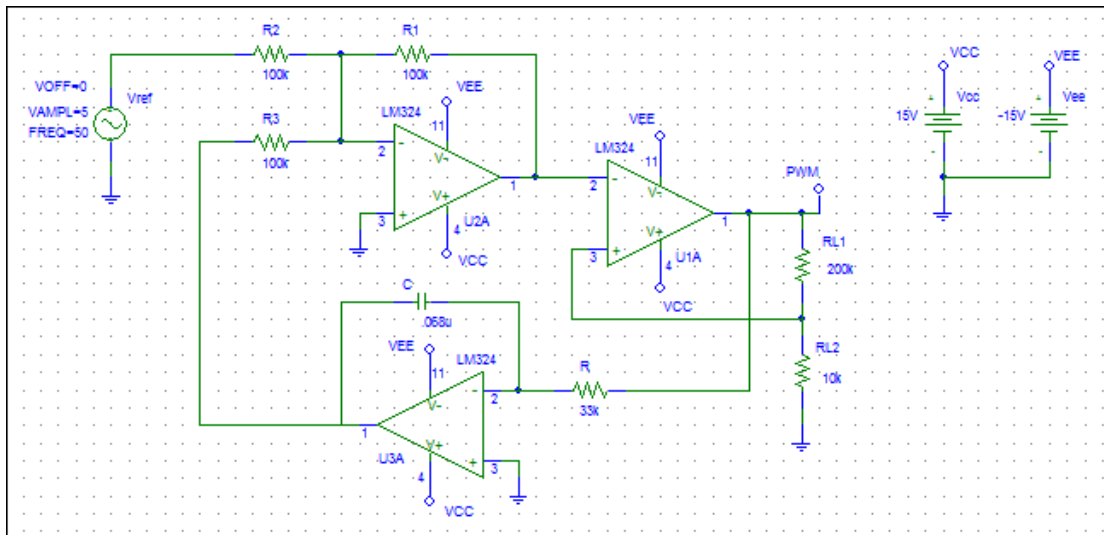
เมื่อแทนสมการที่ (7), (8) และ (9) ในสมการ (5) และ (6) ทำให้ค่าความถี่สวิตช์และดิวิตซ์ไซเคิลของการมอดูเลตแบบเดลต้า เป็นดังสมการ

$$f_s = \frac{V_{CC}^2 - (\tau \cdot \omega \cdot V_m \cos \omega t)^2}{4 \cdot \tau \cdot \Delta v \cdot V_{CC}} \quad (10)$$

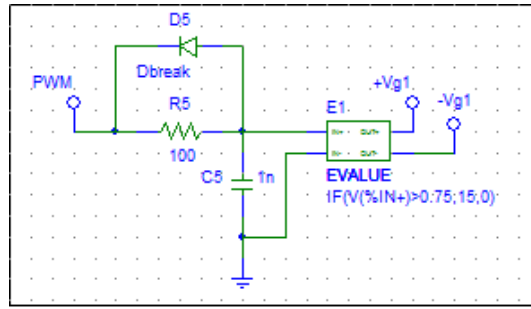
$$D = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\tau \cdot \omega \cdot V_m \cos \omega t}{V_{CC}} \right) \quad (11)$$

3. หลักการทำงาน

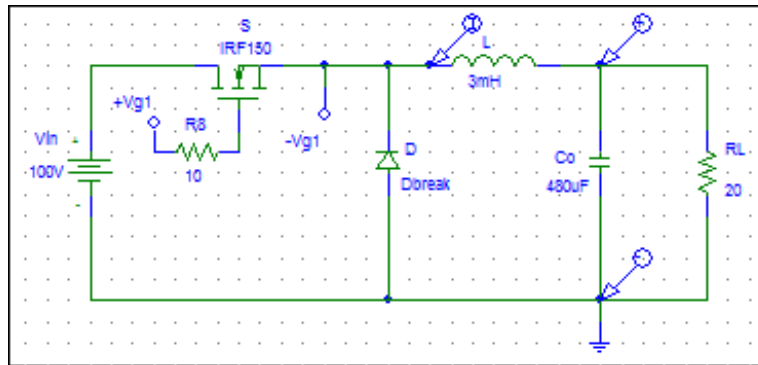
จากรูปภาพที่ 5 แสดงวงจรการมอดูเลตแบบเดลต้าโดยใช้โปรแกรม Pspice [10] การทำงานเริ่มต้นจากวงจรชmitt ทรigger (schmitt trigger: U2A) ต่อเข้ากับตัวอินทิเกรเตอร์ (integrator: U3A) โดยมีสัญญาณด้านเอาต์พุตของตัวอินทิเกรเตอร์ป้อนกลับมายังวงจรชmitt ทรigger โดยผ่านตัวเปรียบเทียบ (comparator: U1A) สัญญาณอ้างอิงรูปไซน์ V_{ref} ถูกป้อนมาที่ด้านอินพุต แล้วจะได้สัญญาณด้านเอาต์พุตเป็นสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มตามต้องการ ส่วนรูปภาพที่ 6 แสดงวงจรขับเกท (gate drive) เพื่อแยกกราวด์กันระหว่างวงจรควบคุมและวงจรภาคกำลังบัคคอนเวอร์เตอร์ นอกจากนี้ยังเป็น การเพิ่มระดับแรงดันให้สามารถขับขาเกทของอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังได้อีกด้วย วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ แสดงดังรูปภาพที่ 7



รูปภาพที่ 5 วงจรการมอดูเลตแบบเดลต้า



รูปภาพที่ 6 วงจรขั้วเกท

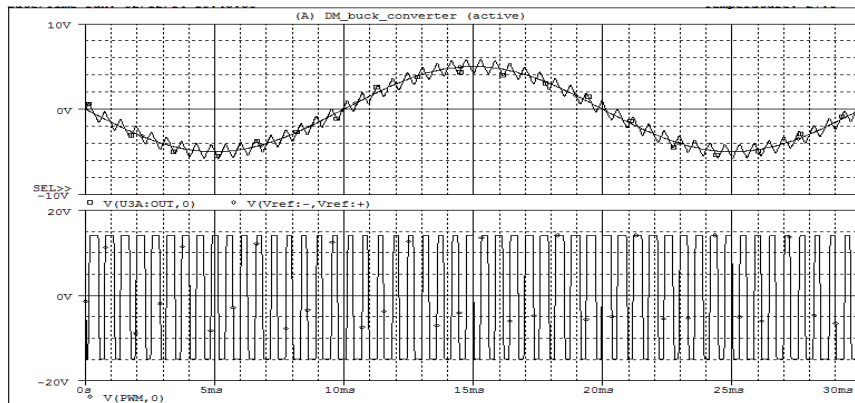


รูปภาพที่ 7 วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

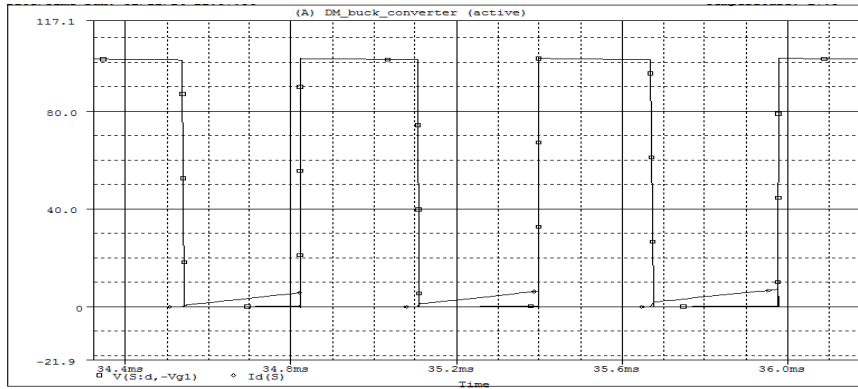
ส่วนรูปภาพที่ 7 แสดงวงจรภาคกำลังบัคคอนเวอร์เตอร์ โดยวงจรรับแรงดันอินพุต 100 โวลต์ ตัวเหนี่ยวนำที่ทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องขนาด 3 มิลลิเฮนรี่ อุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเลือกใช้มอสเฟตกำลังเบอร์ IRF150 และตัวเก็บประจุกรองแรงดันเอาต์พุตขนาด 480 ไมโครฟารัด และโหลดความต้านทาน 20 โอห์ม

4. การจำลองและผลการจำลอง

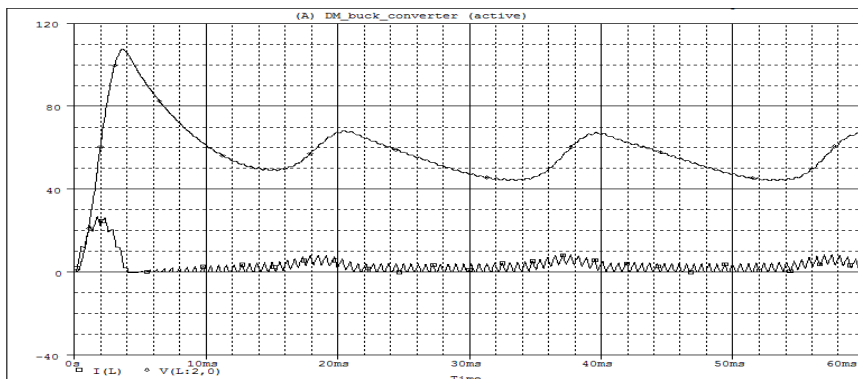
การจำลองระบบจากรูปภาพที่ 5, 6, 7 แสดงดังนี้ รูปภาพที่ 8 รูปบนแสดงสัญญาณอินพุตอ้างอิงไซน์และสัญญาณพาหะที่แทรกและเปรียบเทียบกัน รูปล่างแสดงสัญญาณเอาต์พุตพีดีบีแอลยูเอ็มที่ได้จากการมอดูเลตจะเห็นว่าไม่มีการโอเวอร์ชูดต์ของรูปคลื่น รูปภาพที่ 9 แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสสวิตช์จะเห็นว่าไม่มีการโอเวอร์ชูดต์เช่นกัน รูปภาพที่ 10 แสดงเส้นบนรูปคลื่นแรงดันด้านเอาต์พุต รูปเส้นล่างกระแสไหลที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำ และรูปภาพที่ 11 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำขนาดประมาณ 3 แอมแปร์



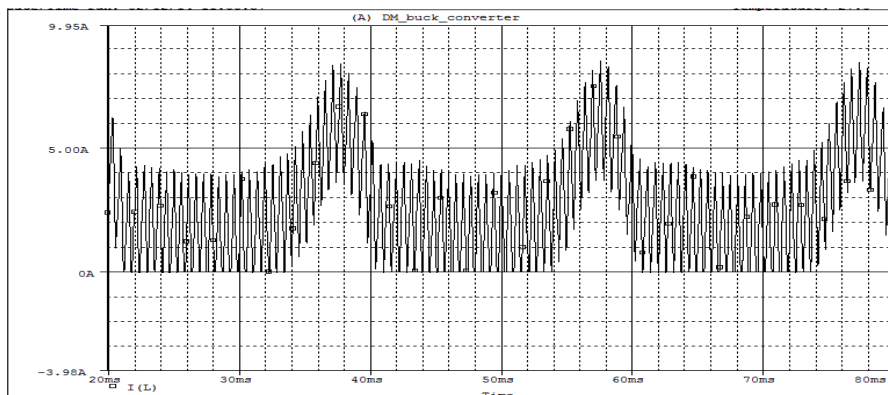
รูปภาพที่ 8 รูปบนสัญญาณอินพุตอ้างอิงไซน์และสัญญาณพาหะ รูปล่างสัญญาณเอาต์พุตพีดีบีแอลยูเอ็ม



รูปภาพที่ 9 รูปคลื่นแรงดันและกระแสสวิตช์



รูปภาพที่ 10 เส้นบนรูปคลื่นแรงดันด้านเอาต์พุต รูปเส้นล่างกระแสตัวเหนี่ยวนำ



รูปภาพที่ 11 กระแสตัวเหนี่ยวนำ

5. บทสรุป

บทความนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบและจำลองการมอดูเลตแบบเดลต้าสำหรับควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงหรือวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ โดยใช้โปรแกรม Pspice ข้อดีของการมอดูเลตแบบนี้คือสามารถลดค่ายอดของสัญญาณที่ความถี่สวิตช์ซึ่งมีค่าลดลงและสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI) จะควบคุมได้ง่ายกว่าที่ความถี่สูง ในบทความวิจัยนี้จะสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มจากการมอดูเลตแบบเดลต้าอย่างง่ายโดยใช้ซอฟต์แวร์เพื่อสร้างสัญญาณพาหะชนิดตรีกเกอร์แล้วป้อนกลับเข้ากับตัวอินทิเกรเตอร์ ผ่านตัวเปรียบเทียบสัญญาณ ซึ่งถ้าหากสัญญาณมากกว่าหรือน้อยกว่าขอบเขตฮิสเทอรีซิส $\pm HB$ สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มจะเปลี่ยนสถานะ ส่วนสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มที่ได้จะต่อผ่านวงจรขับเกท แล้วนำไปขับวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ที่มีการทำงานที่พิกัดกำลังไฟฟ้านด้านเอาต์พุต 200 วัตต์ ที่แรงดันอินพุต 100 โวลต์ จากผลการจำลองในรูปภาพที่ 8, 9 และ 10 พบว่าวงจรตอบสนองต่อระบบควบคุมได้ดี

6. บรรณานุกรม

- [1] บัญชา ทิรัญสิงห์ และ อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ, “การปรับปรุงวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ด้วยวิธีซอฟต์แวร์,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29, ชลบุรี, ฉบับที่ 1, 9-10 พฤศจิกายน 2549, หน้า 525-528.
- [2] บัญชา ทิรัญสิงห์ และ อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ, “การออกแบบวงจรควบคุมของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบซอฟต์แวร์,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 31, นครนายก, ฉบับที่ 1, 29-31 ตุลาคม 2551, หน้า 489-492.
- [3] วริษฐ์ ธรรมศิริโรจน์ และ อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ, “การวิเคราะห์คุณลักษณะของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบลอยตัวที่สถานะคงที่,” วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ 2, ฉบับที่ 1, กุมภาพันธ์ – กรกฎาคม 2549, หน้า 14-21.
- [4] วรพล เอี่ยมศิริ, ปานวิทย์ ฐะนุติ, จีรสุดา โกษิยาภรณ์ และ ปราโมทย์ วาดเขียน, “วงจรซิกมา-เดลตามอดูเลชันอย่างง่าย” การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 43, หน้า 96-102, กรุงเทพฯ, 2548.
- [5] J. Ngarmnil and K. Sooksood, “Rectangular wave delta modulation buck regulator for voltage regulator modules”, The ECTI International conference , pp. 125-128, 2007.
- [6] Yaow-Ming Chen, Yung-Chu Chen and Hsu-Chin Wu, “Improved Delta Modulation Control for PWM Inverter”, The Proceeding of IEEE International Conference on Industrial Technology, pp. 1-6, 2008.
- [7] M. H. Kheraluwala and D. M. Divan, “ Delta Modulation Strategies for Resonant Link Inverters”, IEEE Trans. Power Electron., vol. 5, no. 2, pp. 220-228, Apr. 1990.
- [8] Jonathan W. Kimball, Philip T. Krein and Yongxiang Chen, “Hysteresis and Delta Modulation Control of Converters Using Sensorless Current Moge”, IEEE Trans. Power Electron., vol. 21, no. 4, July. 2006.
- [9] วีระเชษฐ์ ชันเงินและวุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง, พิมพ์ครั้งที่ 4, กรุงเทพฯ, ห้างหุ้นจำกัดวี.เจ.พรีนติ้ง, 2549.
- [10] อภินันท์ อรุโสภา, Pspice สำหรับวงจรแปลงผันกำลัง, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ, ดวงกลมพัลลภ, 2556.