

ผลตอบสนองของค่าความจุของตัวเก็บประจุ ที่อยู่ในวงจรเชื่อมโยงกระแสตรงของ ฟีดแบ็กลิวเอ็มคอนเวอร์เตอร์ – อินเวอร์เตอร์ *

กฤษ เฉยไสย¹⁾ วิชัย ประเสริฐเจริญสุข²⁾ และ อติเรก จันทะคุณ³⁾

¹⁾ อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40002

²⁾ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40002

³⁾ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40002

Email: krit@elec.kku.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลตอบสนองของค่าความจุของตัวเก็บประจุที่อยู่ในวงจรเชื่อมโยงกระแสตรงของฟีดแบ็กลิวเอ็มคอนเวอร์เตอร์-อินเวอร์เตอร์ โดยศึกษาการทำงานของ วงจรฟีดแบ็กลิวเอ็มคอนเวอร์เตอร์-อินเวอร์เตอร์ แล้วเขียนโปรแกรมจำลองการทำงาน เพื่อศึกษาถึงผลตอบสนอง ขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุของตัวเก็บประจุในวงจรเชื่อมโยงกระแสตรง ซึ่งผลการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์พบว่า ริปเปิ้ลของแรงดันในวงจรเชื่อมโยงกระแสตรงและค่าฮาร์มอนิกรวมของกระแสอินพุตมีความสัมพันธ์กับค่าความจุของตัวเก็บประจุและความถี่ของสัญญาณคลื่นพาหะที่ใช้สร้างสัญญาณฟีดแบ็กลิวเอ็ม

คำสำคัญ: วงจรเชื่อมโยงกระแสตรง , คอนเวอร์เตอร์-อินเวอร์เตอร์

* รับต้นฉบับเมื่อวันที่ 27 สิงหาคม 2547 และได้รับบทความฉบับแก้ไขเมื่อวันที่ 17 กันยายน 2547

The Response of DC-Link Capacitance in a PWM Converter Inverter *

Krit Choeisai ¹⁾ Vichai Prasertcharoensuk ²⁾ and Adirek Jantakun ³⁾

¹⁾ Lecture, Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002

²⁾ Assistant Professor, Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon kaen 40002

²⁾ Graduated Student, Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon kaen 40002

Email: krit@elec.kku.ac.th

Abstract

This paper presents the response of DC-Link capacitance in a PWM Converter Inverter by studying and simulation. The simulation effects that DC-Link capacitance changed. The results showed that the voltage ripple of the DC-Link and total harmonics distortion of input current varied to the capacitance and the switching frequency which use to generate the PWM signal.

Keywords: DC-Link , Converter-Inverter

บทนำ

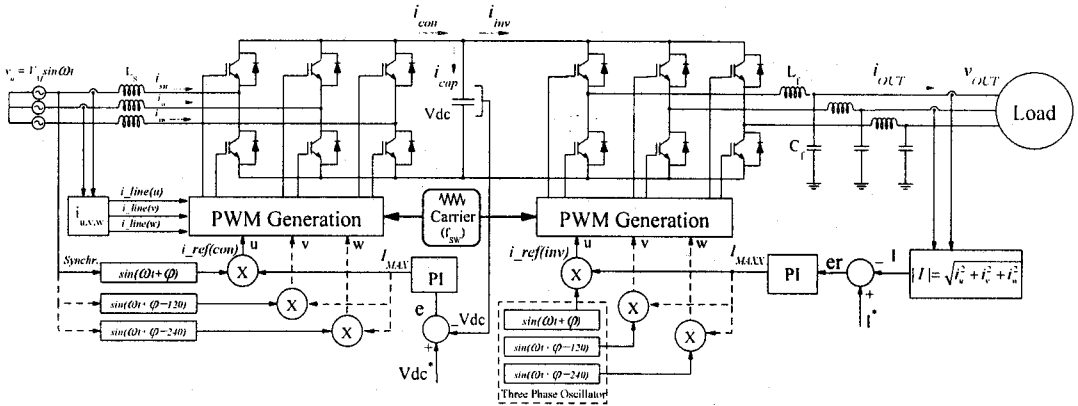
ในปัจจุบันคอนเวอร์เตอร์-อินเวอร์เตอร์ ถูกนำมาใช้งานการจ่ายกำลังไฟฟ้าอย่างกว้างขวาง เช่น ใช้ในระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากำลังแบบเสถียรภาพ (Voltage Stabilizer) ใช้ในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าเพื่อ ขับเคลื่อนมอเตอร์ (Motor Drive) ฯลฯ อินเวอร์เตอร์ที่จะจ่ายกำลังไฟฟ้าแกโหลด ได้อย่างมีประสิทธิภาพจะต้องมีแรงดันในวงจรเชื่อมโยงกระแสตรง (Vdc) ของคอนเวอร์เตอร์คงที่ การที่จะทำให้แรงดันในวงจรเชื่อมโยงกระแสตรงคงที่จำเป็นต้องใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุมาก โดยที่ตัวเก็บประจุชนิดนี้ต้องเป็นชนิด อิเล็กโทรลิติก (Electrolytic) แต่มักจะเกิดข้อบกพร่อง [Wen ong Chien, Ying Yu Tzon. 1998.and Joohn Sheok Kim, Seung Ki Sul. 1993.] ดังนี้

- 1) ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรลิติกมักเป็นตัวยกอายุการใช้งานของคอนเวอร์เตอร์ เนื่องจากตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรลิติกที่ใช้งานที่มีกำลังสูงหรือแรงดันสูงมักมีอายุการใช้งานที่จำกัด
- 2) ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรลิติกที่มีค่าความจุมากมักมีขนาดโต ทำให้ขนาดของคอนเวอร์เตอร์มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น
- 3) ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรลิติกมีข้อจำกัดเกี่ยวกับการใช้งานในที่ที่มีอุณหภูมิสูง
- 4) ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรลิติกที่มีค่าความจุมากและทนแรงดันได้สูง มักมีราคาแพง ซึ่งทำให้ราคาของคอนเวอร์เตอร์แพงขึ้น

ดังนั้นหากลดค่าความจุของตัวเก็บประจุลงได้และเปลี่ยนมาใช้ตัวเก็บประจุชนิดอื่นแทน เช่น ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก จะมีอายุการใช้งานนานกว่า มีขนาดเล็กกว่า ทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดีกว่าและมีราคาถูกกว่า แต่การลดค่าความจุของตัวเก็บประจุลงนั้น อาจทำให้แรงดันในวงจรเชื่อมโยงกระแสตรงเพี้ยนหรือมีผลต่อค่าฮาร์โมนิกรวม (Total harmonic distortion :THD) ของกระแสอินพุตของระบบ รวมทั้งอาจทำให้ริปล (Ripple) ของกระแสอินพุตมีค่ามากขึ้นด้วย ดังนั้นเพื่อให้เข้าใจผลตอบสนองของฟีดแบ็คลิฟต์เอ็มคอนเวอร์เตอร์-อินเวอร์เตอร์ที่มีต่อค่าความจุของตัวเก็บประจุ จึงมีความจำเป็นที่ต้องทำการศึกษาผลตอบสนองของค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรเชื่อมโยงกระแสตรงของฟีดแบ็คลิฟต์เอ็มคอนเวอร์เตอร์-อินเวอร์เตอร์

วงจรฟีดแบ็คลิฟต์เอ็มคอนเวอร์เตอร์-อินเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 1 เป็นวงจรฟีดแบ็คลิฟต์เอ็มคอนเวอร์เตอร์-อินเวอร์เตอร์ ซึ่งประกอบด้วย ส่วนของคอนเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันในวงจรเชื่อมโยงกระแสตรงให้คงที่และส่วนที่เป็นอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่ควบคุมให้กระแสเอาต์พุตคงที่ โดยที่ทั้งสองส่วนใช้สัญญาณคลื่นพาหะจากแหล่งกำเนิดเดียวกันในการสร้างสัญญาณฟีดแบ็คลิฟต์เอ็ม



รูปที่ 1 วงจรพีดับลิวเอ็มคอนเวอร์เตอร์-อินเวอร์เตอร์

การรักษาระดับแรงดันในวงจรเชื่อมโยงกระแสตรง

การทำงานของคอนเวอร์เตอร์เพื่อรักษาระดับแรงดันในวงจรเชื่อมโยงตรงกระแสตรงให้คงที่ จะทำการเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่วัดได้จากวงจรเชื่อมโยงกระแสตรง (V_{dc}) กับค่าแรงดันอ้างอิง (V_{dc}^*) ทำให้ได้ค่าสัญญาณผิดพลาด (Error signal: e) เข้าวงจรควบคุมแบบพีไอ (PI) และนำไปสร้างเป็นกระแสอ้างอิง (i_{ref}) ที่มีความถี่และ เฟสเดียวกันกับแรงดันอินพุต แล้วนำไปเปรียบเทียบกับกระแสอินพุต (i_{line}) ให้ได้ค่าความแตกต่าง เพื่อนำไปสร้างสัญญาณพีดับลิวเอ็มไปควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ให้รักษาระดับแรงดันในวงจรเชื่อมโยงตรงกระแสตรงคงที่

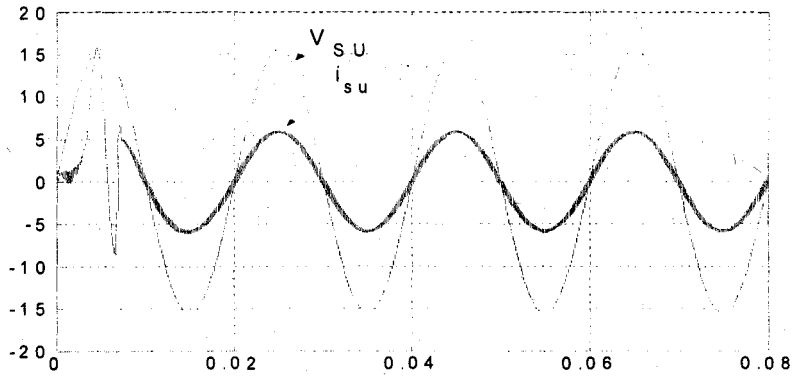
การควบคุมกระแสเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ให้คงที่

การควบคุมกระแสเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ให้คงที่ ทำได้โดยเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ ($|i|$) กับค่ากระแสไฟฟ้าที่กำหนด (i^*) ผลการเปรียบเทียบของกระแสทั้งสองจะเกิดค่าสัญญาณผิดพลาด (Error signal : er) เข้าวงจรควบคุมแบบพีไอ และนำไปสร้างเป็นสัญญาณกระแสผิดพลาดรูปคลื่นไซน์ ($i_{ref(inv)}$) เพื่อที่จะควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ให้กระแสเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์คงที่ตามต้องการ

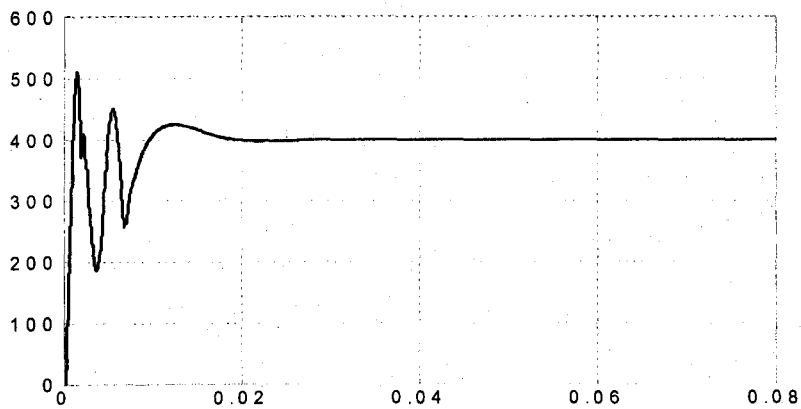
ผลการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์

จากวงจรพีดับลิวเอ็มคอนเวอร์เตอร์-อินเวอร์เตอร์ ในรูปที่ 1 นำมาเขียนเป็นโปรแกรมจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม MatLab เพื่อศึกษาผลตอบสนองของค่าความจุของตัวเก็บประจุในวงจรเชื่อมโยงกระแสตรง เมื่อกำหนดให้ แรงดันอินพุต (V_{su}) = 220V. ความถี่ 50Hz. , ขดลวดทางเข้า (L_s) = 8mH. , ความถี่สัญญาณคลื่นพาหะของคอนเวอร์เตอร์-อินเวอร์เตอร์ (f_{sw}) = 20KHz , แรงดันในวงจรเชื่อมโยงกระแสตรง (V_{dc}) = 400V. , ตัวเก็บประจุในวงจรเชื่อมโยงในวงจรเชื่อมโยงกระแสตรง (C) =

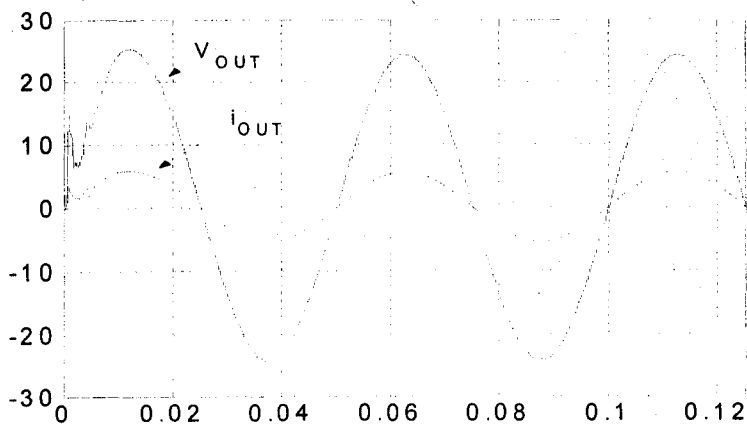
$50\mu\text{F}$, ความถี่เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์(f_{inv}) = 20Hz ., โหลดความต้านทาน(Resistive load)ขนาด = 1100Ω .



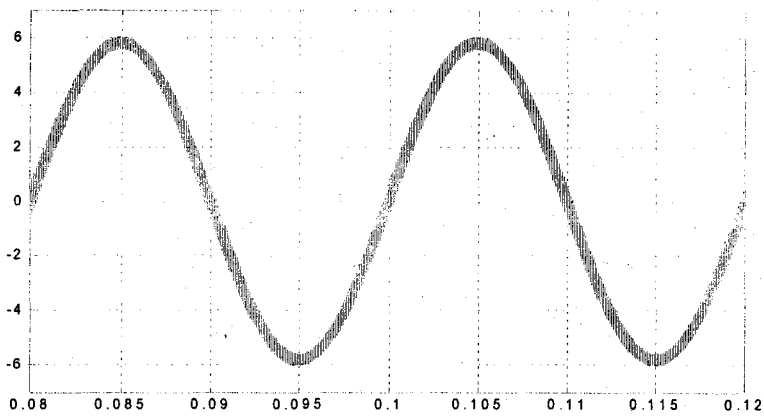
รูปที่ 2 แรงดันอินพุต(v_{su}) และกระแสอินพุต(i_{su}) ของระบบ



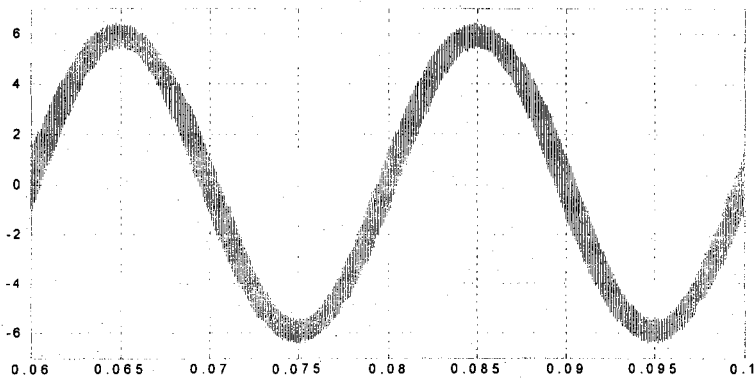
รูปที่ 3 แรงดันในวงจรเชื่อมโยงกระแสตรง(V_{dc})



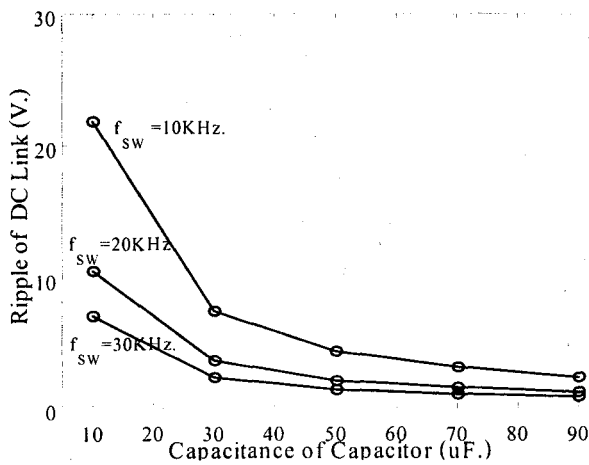
รูปที่ 4 แรงดันเอาต์พุต(v_{out}) และกระแสเอาต์พุต(i_{out}) ของระบบ



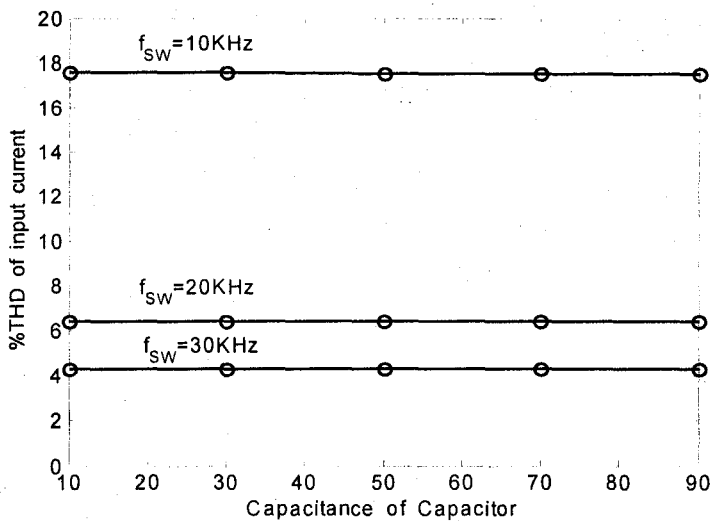
รูปที่ 5 กระแสอินพุต i_{SU} เมื่อ $f_{SW} = 20 \text{ KHz}$, $THD = 6.39\%$



รูปที่ 6 กระแสอินพุต i_{SU} เมื่อ $f_{SW} = 10 \text{ KHz}$, $THD = 17.35\%$



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างริปเปิ้ลของแรงดัน V_{dc} กับค่าความจุของตัวเก็บประจุที่มีผลต่อความถี่ f_{SW}



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า THD ของกระแสอินพุตและค่าความจุของตัวเก็บประจุที่มีผลต่อความถี่ f_{sw}

จากรูปที่ 2 จะเห็นว่าช่วงเริ่มต้นกระแสอินพุตของระบบจะมีค่าสูงเนื่องจากคอนเวอร์เตอร์ต้องการให้เอาต์พุตมีขนาดแรงดัน Vdc ตามต้องการ แรงดันอินพุต (v_{su}) และกระแสอินพุต (i_{su}) มีเฟสเดียวกัน สังเกตได้ว่าการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ทำให้ค่าตัวประกอบกำลัง (Power factor) มีค่าเป็นหนึ่งหรือใกล้เคียงหนึ่ง

จากรูปที่ 3 จะเห็นว่าคอนเวอร์เตอร์จะควบคุมให้มีแรงดัน Vdc ตามต้องการและเมื่อแรงดัน Vdc คงที่ จะมีแรงดันริปเปิ้ลประมาณ 2.1 โวลต์ หากคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ริปเปิ้ล (Percent of Vdc ripple) จะมีค่าประมาณ 0.52% แสดงให้เห็นว่าคอนเวอร์เตอร์ทำงานมีประสิทธิภาพ เนื่องจากแรงดัน Vdc คงที่ตามต้องการและมีค่าเปอร์เซ็นต์ริปเปิ้ลน้อย

จากรูปที่ 4 เป็นรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุต (v_{out}) และกระแสเอาต์พุต (i_{out}) ของอินเวอร์เตอร์ จะเห็นว่าอินเวอร์เตอร์ทำงานมีประสิทธิภาพตามต้องการ. เนื่องจาก v_{out} และ i_{out} มีเฟสเดียวกันและมีค่าคงที่

เมื่อแรงดัน Vdc คงที่และกระแสอินพุตคงที่ ค่า THD ของกระแสอินพุต [Timothy L. Skvarenina. 2001.] จะเท่ากับ 6.39% ซึ่งคำนวณค่า THD ได้จาก

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^m i_n^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^m i_n^2}} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ THD คือ ค่าฮาร์โมนิกรวม (Total harmonic distortion)

i_n คือ ส่วนประกอบของอันดับฮาร์โมนิกกระแสอันดับที่ n

m คือ อันดับฮาร์โมนิกกระแสสูงสุดที่ใช้คำนวณ (ในที่นี้ให้ $m = 2000$
และ $m_1 = 50$ Hz. ฉะนั้น $m = 2000$ จะเท่ากับความถี่ 100 KHz.)

เปรียบเทียบความถี่ f_{sw} ที่มีผลต่อกระแสอินพุตของระบบ

จากรูปที่ 5 เมื่อความถี่คลื่นพาหะ (f_{sw}) = 20 KHz. ทำให้ริปเปิ้ลของกระแสอินพุตมีค่าประมาณ 0.50A. ค่าพิกัดค่า THD ของกระแสอินพุตจะเท่ากับ 6.39% จากรูปที่ 6 เปลี่ยนความถี่ $f_{sw} = 10$ KHz. ทำให้ริปเปิ้ลของกระแสอินพุตประมาณ 1.05 A. ค่าพิกัดค่า THD ของกระแสอินพุตจะเท่ากับ 17.35% เมื่อเปรียบเทียบผลของกระแสอินพุตที่มีต่อ f_{sw} จะพบว่า ถ้าความถี่ f_{sw} สูงขึ้นริปเปิ้ลของกระแสอินพุตจะลดลงเพราะความถี่ f_{sw} ที่สูงขึ้นจะทำให้การสวิตช์ของสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ในคอนเวอร์เตอร์ทำงานเร็วขึ้นทำให้ริปเปิ้ลของกระแสอินพุตลดลงเมื่อค่าพิกัดค่า THD ของกระแสอินพุตจะเห็นว่ามีค่าลดลงด้วย ดังนั้นจากผลดังกล่าวสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า THD , ริปเปิ้ลของกระแสอินพุตและความถี่ f_{sw} ได้ดังนี้

$$\text{ค่า THD} \propto \text{ริปเปิ้ลของกระแสอินพุต} \propto \frac{1}{f_{sw}} \quad (2)$$

เปรียบเทียบค่าความจุของตัวเก็บประจุที่มีผลต่อระบบ

จากรูปที่ 7 จะเห็นว่าเมื่อเปลี่ยนค่าความจุของตัวเก็บประจุในวงจรเชื่อมโยงกระแสตรงจะมีผลต่อริปเปิ้ลของแรงดัน Vdc คือถ้าค่าความจุมีค่าน้อยริปเปิ้ลของแรงดัน Vdc จะมีมาก ถ้าค่าความจุมีค่ามากริปเปิ้ลของแรงดัน Vdc จะมีน้อยสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุกับริปเปิ้ลของแรงดัน Vdc ได้ดังสมการ

$$i_{C(\text{ripple})} \propto C \frac{V_{dc(\text{ripple})}}{t_{sw}} \quad (3)$$

$$V_{dc(\text{ripple})} \propto \frac{i_{C(\text{ripple})} t_{sw}}{C} \quad (4)$$

เมื่อ $V_{dc(\text{ripple})}$ คือ แรงดันริปเปิ้ลของแรงดัน Vdc (V.)

$i_{C(\text{ripple})}$ คือ ริปเปิ้ลของกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ (A.)

C คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุในวงจรเชื่อมโยงกระแสตรง (μF)

$$t_{sw} \quad \text{คือ เวลาของ } f_{sw} \text{ (จาก } t_{sw} = \frac{1}{f_{sw}} \text{) (s.)}$$

จากสมการที่ (3) และ (4) ทำให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุของตัวเก็บประจุกับริปเปิลของแรงดัน V_{dc} ได้อย่างชัดเจน จากรูปที่ 7 ในช่วงค่าความจุตั้งแต่ $10\mu F - 50\mu F$ พบว่าเมื่อความถี่ f_{sw} สูงขึ้นริปเปิลของแรงดัน V_{dc} จะลดลงเช่นกันเนื่องจากริปเปิลของกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ ($i_C(\text{ripple})$) มีค่าลดลงทั้งนี้เพราะความถี่ f_{sw} ที่สูงขึ้นจะทำให้ริปเปิลของกระแสอินพุตลดลงและในช่วงค่าความจุตั้งแต่ $50\mu F - 90\mu F$ พบว่าริปเปิลของแรงดัน V_{dc} จะมีค่าต่างกันเพียงเล็กน้อยโดยสังเกตได้จากสมการที่ (4) ริปเปิลของแรงดัน V_{dc} จะมีผลตอบสนองต่อค่าความจุที่เพิ่มมากขึ้นมากกว่าความถี่ f_{sw} ทำให้คาดการณ์ได้ว่าหากเพิ่มค่าความจุให้มีค่ามากกว่า $90\mu F$ ริปเปิลของแรงดัน V_{dc} จะมีค่าเท่าเดิมไม่เปลี่ยนแปลง จากเหตุผลดังกล่าวทำให้สามารถใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุเพียง $40\mu F - 50\mu F$ ได้ โดยไม่มีความจำเป็นต้องใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุมากถึง $90\mu F$

จากรูปที่ 8 จะเห็นว่าค่า THD ของกระแสอินพุตไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าความจุของตัวเก็บประจุ เนื่องจากเมื่อทำการเปลี่ยนค่าความจุ ค่า THD ของกระแสอินพุตจะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย (ประมาณ 0.04%) ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปจะสังเกตไม่เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเลย แต่เมื่อเปลี่ยนความถี่ f_{sw} ให้มีความถี่สูงขึ้นจะพบว่าค่า THD ของกระแสอินพุตจะลดลง ซึ่งได้อธิบายถึงสาเหตุและความสัมพันธ์แล้วในหัวที่ผ่านมา

สรุป

ผลการศึกษา ผลตอบสนองของค่าความจุของตัวเก็บประจุที่อยู่ในวงจรเชื่อมโยงกระแสตรง (V_{dc}) ของฟีดแบ็คลิแวนคอนเวอร์เตอร์-อินเวอร์เตอร์ พบว่าการเปลี่ยนค่าความจุจะมีผลต่อริปเปิลของแรงดัน V_{dc} คือถ้าค่าความจุมีค่าน้อยริปเปิลของแรงดัน V_{dc} จะมีมาก ถ้าค่าความจุมีค่ามากริปเปิลของแรงดัน V_{dc} จะมีน้อยและเมื่อเพิ่มค่าความจุให้มีค่ามากขึ้น (มากกว่า $90\mu F$) ริปเปิลของแรงดัน V_{dc} จะมีค่าเท่าเดิมไม่เปลี่ยนแปลงทำให้สามารถใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุเพียง $40\mu F - 50\mu F$ ได้ ส่วนค่า THD ของกระแสอินพุตไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าความจุเนื่องจากเมื่อทำการเปลี่ยนค่าความจุค่า THD ของกระแสอินพุตจะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยแต่เมื่อเปลี่ยนความถี่ f_{sw} ให้สูงขึ้นพบว่าค่า THD ของกระแสอินพุตจะลดลง

กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับการสนับสนุนเครื่องมือจากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยขอนแก่นและขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตขอนแก่นที่ให้ทุนอุดหนุนในการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Joohn Sheok Kim, Seung Ki Sul. 1993. New Control Scheme for AC-DC-AC Converter Without Electrolytic Capacitor. **IEEE**: 300 –306.
- Timothy L. Skvarenina. 2001. **The Power Electronics Handbook**. NewYork: Crc Press.
- Wen ong Chien, Ying Yu Tzon. 1998. Analysis and Design on the Reduction of DC Link Electrolytic capacitor for AC/DC/AC Converter Applied to AC Motor Drives.**IEEE**:275-279.