

การวิเคราะห์คุณลักษณะของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์แบบลอยตัวที่สถานะคงที่ Analysis of Steady-State Characteristics of a Floating Buck Converter

วิชชุ ธรรมศิริโรจน์¹ และ อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ²

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง หรือวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ ที่ใช้เทคนิคการลอยตัวแรงดันไฟฟ้า ซึ่งมีข้อดีคือ สามารถลดแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ได้ โดยอาศัยการเก็บพลังงานที่ขดปฐมภูมิของหม้อแปลงในขณะที่สวิตช์นำกระแส ทำให้ขดทุติยภูมิมีความต่างศักย์เกิดขึ้น ซึ่งอาจนำโพลไปต่อเพิ่มได้ ในขณะที่สวิตช์หยุดนำกระแส จะมีจุดกราวด์เสมือนเกิดขึ้นที่สวิตช์ ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์จึงลดลงเหลือประมาณเท่ากับแรงดันที่แหล่งจ่ายลบด้วยแรงดันที่จุดกราวด์เสมือน โดยในบทความนี้จะนำเสนอการวิเคราะห์คุณลักษณะที่สถานะคงที่ และหลักการทำงานของวงจรในโหมดกระแสต่อเนื่อง โดยใช้ผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

คำสำคัญ : วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์แบบลอยตัว, คุณลักษณะที่สถานะคงที่, การวิเคราะห์วงจร

Abstract

This paper presents a dc-dc buck converter using the floating technique that can reduce the open-switch voltage requirements. This circuit includes a transformer; which the primary coil is charged by an input voltage when the switch is in the closed-circuit condition. The secondary coil of the transformer is arranged to an auxiliary potential that may be coupled to an auxiliary load. The auxiliary potential is further arranged to operate as a virtual ground node with respect to the switch such that the open circuit voltage requirements for the switch are reduced. The open circuit voltage across the switch is approximately equal to the input voltage minus the voltage across the virtual ground node. In addition, the steady-state characteristics analysis and the principle of operation in continuous-current mode are presented and also simulated by computer software.

Keywords : floating buck converter, steady-state characteristics, circuit analysis

¹ อาจารย์, ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1. บทนำ

ปัจจุบันมีการนำวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาใช้ในชีวิตประจำวันอย่างแพร่หลาย เหตุผลสำคัญก็เพื่อให้อุปกรณ์นั้น ๆ มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (dc power supply) ก็เป็นอีกสิ่งหนึ่งที่ได้มีการนำวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาใช้ เพราะให้ประสิทธิภาพที่สูง ขนาดเล็ก น้ำหนักเบา การออกแบบวงจรให้ได้ประสิทธิภาพดี ราคาถูก จึงเป็นสิ่งสำคัญในการแข่งขันทางการตลาด การเลือกอุปกรณ์สวิตซิง (switching device) [1-6] ถือเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดราคาของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เนื่องจากอุปกรณ์สวิตซิงมีราคาค่อนข้างแพง เมื่อเทียบกับชิ้นส่วนอื่น ๆ ผู้ออกแบบวงจรที่มีอุปกรณ์สวิตซิง จึงพยายามใช้อุปกรณ์สวิตซิงที่สามารถรับพิกัดแรงดันที่ไม่สูงเกินไป เนื่องจากพิกัดแรงดันที่สูงขึ้นจะทำให้ราคาของต้นทุนสูงขึ้นมาก เมื่อเทียบกับพิกัดกระแสที่สูงขึ้น (ที่พิกัดกำลังเท่ากัน) ดังนั้นหากสามารถลดพิกัดแรงดันของอุปกรณ์สวิตซิงได้มาก ต้นทุนรวมของวงจรก็จะยิ่งต่ำลง

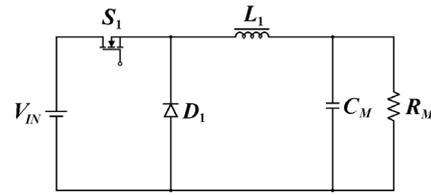
เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงส่วนมาก จะเป็นการแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าให้ต่ำลง เนื่องจากไฟฟ้าที่ใช้ตามบ้านนั้นเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแรงดัน 220 V 50 Hz เมื่อแปลงเป็นกระแสตรงจะได้แรงดันไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 300 V แต่ในการใช้งานโดยปกตินั้น จะใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ค่อนข้างต่ำ (ไม่ถึง 50 V) เนื่องจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่วนมากมักจะใช้แรงดันต่ำ ดังนั้นวงจรลดระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง หรือ วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ (buck converter) จึงมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย ปัญหาส่วนมากของวงจร คือ อุปกรณ์สวิตซิงต้องสามารถทนแรงดันตกคร่อมในขณะที่หยุดนำกระแสอย่างน้อยเท่ากับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาเข้า (ไม่รวมแรงดันทรานเซียนท์ที่เกิดขึ้นในขณะที่เปลี่ยนจากนำกระแสเป็นหยุดนำกระแส) หรือประมาณ 310 V

จากปัญหาดังกล่าว บทความนี้จึงนำเสนอวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ที่สามารถลดระดับแรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์สวิตซิงในขณะที่หยุดนำกระแสให้มีค่าลดลงเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาเข้า หรือประมาณ 150 V และยังสามารถแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าให้ต่ำลงได้เหมือนเดิม โดยที่ประสิทธิภาพสูงเทียบเท่าวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ทั่วไป

2. วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

2.1 วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์แบบทั่วไป

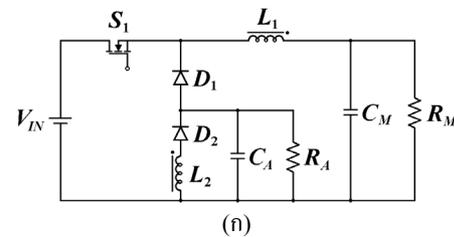
วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์แบบทั่วไป คือ วงจรลดระดับแรงดันไฟฟ้าจากกระแสตรง เป็นกระแสตรง โดยทั่วไปประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำเป็นตัวเก็บพลังงาน เพื่อจ่ายในช่วงเวลาที่สวิตซิงหยุดนำกระแส ซึ่งกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำจะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นเมื่อสวิตซิงนำกระแส ตัวเก็บประจุซึ่งต่ออยู่กับโหลดเป็นตัวลดแรงดันกระแสที่ขาออก ไดโอดต่ออยู่กับตัวเหนี่ยวนำ เพื่อกำหนดทิศทางให้กระแสไหลผ่านในขณะที่สวิตซิงหยุดนำกระแส ในช่วงนี้กระแสที่ตัวเหนี่ยวนำจะลดลง การต่อโหลด ไดโอดและตัวเก็บประจุต่อเข้ากับกราวด์ของระบบดังรูปที่ 1 ทำให้ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมสวิตซิงในขณะที่สวิตซิงหยุดนำกระแสมีค่าสูงเท่ากับความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง [7-9]



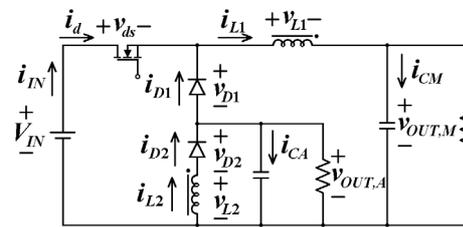
รูปที่ 1 วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์แบบทั่วไป

2.2 วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์แบบลอยตัว

วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์แบบลอยตัว [10] คือ วงจรที่สามารถลดแรงดันที่ตกคร่อมสวิตซิง วงจรนี้อาศัยการเก็บพลังงานที่ขดปฐมภูมิของหม้อแปลงในขณะที่สวิตซิงนำกระแส ทำให้ขดทุติยภูมิมีความต่างศักย์ช่วยเกิดขึ้น ซึ่งอาจนำไปต่อเพิ่มได้ ดังรูปที่ 2 ความต่างศักย์ช่วย (auxiliary potential) ที่เกิดขึ้นนี้ทำให้เกิดจุดกราวด์เสมือนที่สวิตซิง ในขณะที่สวิตซิงหยุดนำกระแส แรงดันที่ตกคร่อมสวิตซิงจึงลดลงเหลือประมาณเท่ากับแรงดันที่แหล่งจ่ายลบด้วยแรงดันที่จุดกราวด์เสมือน



(ก)



(ข)

รูปที่ 2 วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์แบบลอยตัว

(ก) ลักษณะวงจร (ข) ตำแหน่งในการวัดแรงดันและกระแส

2.2.1 ลักษณะและส่วนประกอบของวงจร

วงจรมีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง V_{IN} ทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านสวิตซิง S_1 ไปยังขดปฐมภูมิของหม้อแปลง T_1 ซึ่งหม้อแปลงก็จะสะสมพลังงานเอาไว้ และสร้างแรงดันขาออกหลัก $V_{OUT,M}$ และแรงดันขาออกช่วย $V_{OUT,A}$ ตัวเก็บประจุ C_M ทำหน้าที่เก็บประจุเพื่อลดการกระเพื่อมของแรงดันขาออกหลัก ในขณะเดียวกัน ตัวเก็บประจุ C_A ก็มีไว้เพื่อลดการกระเพื่อมของแรงดันขาออกช่วย

แรงดันไฟฟ้าขาออกหลัก $V_{OUT,M}$ เกิดจากขดปฐมภูมิ L_1 ขณะที่สวิตซิงนำกระแส ขดปฐมภูมิ L_1 จะเก็บพลังงาน เมื่อสวิตซิงนำกระแสกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านขดปฐมภูมิ L_1 ไปยังโหลดหลัก R_M และย้อนกลับไปที่กราวด์ของวงจร กระแสที่ผ่านขดปฐมภูมิ L_1 จะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น แรงดันไฟฟ้าขาออกช่วย $V_{OUT,A}$ ซึ่งเกิดจากขดทุติย

ภูมิ L_2 จะชาร์จในขณะที่มีกระแสไหลผ่านขดปฐมภูมิ L_1 ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ทั่วไปของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนั้นกระแสที่ผ่านขดทุติยภูมิ L_2 จะเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสที่ผ่านขดปฐมภูมิ L_1 เพิ่มขึ้น (ช่วงที่สวิตช์นำกระแส)

เมื่อสวิตช์หยุดนำกระแส กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดปฐมภูมิ L_1 จะลดลงอย่างเป็นเชิงเส้น ไดโอด D_1 ทำหน้าที่เป็นวงจรเรียงกระแส ทำให้กระแสที่ผ่านขดปฐมภูมิ L_1 ไม่ขาดช่วง เหมือนกระแสที่ผ่านไดโอด D_1 ขณะเดียวกันกระแสที่ผ่านขดทุติยภูมิ L_2 จะลดลงตามกฎของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยเช่นกัน ไดโอด D_2 ทำให้กระแสที่ผ่านขดทุติยภูมิ L_2 มีทิศทางเดียวกันกับแรงดันขาออกช่วย $V_{OUT,A}$ ที่ส่งผ่านไปยังโหลดช่วย R_A

ในวงจรนี้ แรงดันไฟฟ้าขาออกช่วย $V_{OUT,A}$ จะถูกใช้เป็นแหล่งจ่ายขาออกช่วยและทำหน้าที่เป็นกราวด์เสมือนในเวลาเดียวกัน แรงดันไฟฟ้าช่วยนี้ถูกสร้างขึ้นมาจากพลังงานย้อนกลับของหม้อแปลงไฟฟ้า ช่วยลดแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ S_1 ในขณะที่สวิตช์หยุดนำกระแส

แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดหลัก $V_{OUT,M}$ และโหลดช่วย $V_{OUT,A}$ จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลาในการนำกระแสของสวิตช์ S_1 และอัตราส่วนจำนวนรอบ a ของหม้อแปลง T_1 ถ้าไม่คิดการสูญเสียในไดโอด และความต้านทานที่สวิตช์ในขณะนำกระแส และกำหนดให้อัตราส่วนจำนวนรอบปฐมภูมิต่อทุติยภูมิ a ของหม้อแปลงมีค่าเท่ากับ 1 จะสามารถวิเคราะห์การทำงานได้ดังนี้

ระหว่างที่สวิตช์นำกระแส ดังแสดงในรูปที่ 3 แรงดันไฟฟ้า v_{L1} ที่ตกคร่อมขดปฐมภูมิ L_1 จะมีค่าเท่ากับ $V_{IN} - V_{OUT,M}$ และเมื่อสวิตช์หยุดนำกระแส แรงดันที่ตกคร่อมขดปฐมภูมิ L_1 จะมีค่าเปลี่ยนไปเป็น $V_{OUT,M} - V_{OUT,A}$ ดังนั้นแรงดัน v_{L2} ที่ตกคร่อมขดทุติยภูมิ L_2 จึงมีค่าเท่ากับแรงดันที่ตกคร่อมขดปฐมภูมิ L_1 ซึ่งจะได้ว่าแรงดันไฟฟ้าขาออกช่วย $V_{OUT,A}$ มีค่าเท่ากับ $V_{OUT,M} - V_{OUT,A}$ หรือ $V_{OUT,A} = V_{OUT,M} / 2$ เมื่ออัตราส่วนจำนวนรอบ a ของหม้อแปลงมีค่าเท่ากับ 1

ดีวีซีเคิล (D) สามารถหาได้จากกฎเรื่องผลรวมของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำคูณด้วยเวลาในหนึ่งคาบจะเท่ากับศูนย์ ดังนี้

$$(V_{IN} - V_{OUT,M}) \cdot t_{ON} = (V_{OUT,M} - V_{OUT,A}) \cdot t_{OFF} \quad (1)$$

เมื่อกำหนดให้ $V_{OUT,A} = \frac{V_{OUT,M}}{2}$ จะสามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$(V_{IN} - V_{OUT,M}) \cdot t_{ON} = \frac{(V_{OUT,M} \cdot t_{OFF})}{2} \quad (2)$$

$$\frac{t_{ON}}{t_{OFF}} = \frac{(V_{OUT,M})}{2(V_{IN} - V_{OUT,M})} \quad (3)$$

กำหนดให้ดีวีซีเคิล (D) ให้เป็นไปตามนิยามจะได้

$$D = \frac{t_{ON}}{T} = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} = \frac{1}{1 + \frac{t_{OFF}}{t_{ON}}} \quad (4)$$

แทนสมการที่ (3) ลงในสมการที่ (4) จะได้

$$D = \frac{V_{OUT,M}}{(2 \cdot V_{IN}) - V_{OUT,M}} \quad (5)$$

และถ้าอัตราส่วนจำนวนรอบ a ของหม้อแปลงมีค่าไม่เท่ากับ 1 จะได้

$$V_{OUT,A} = \frac{V_{OUT,M}}{1+a} \quad (6)$$

จากสมการที่ (1) ถึงสมการที่ (6) สามารถหารูปทั่วไปของดีวีซีเคิล D ในรูปของความสัมพันธ์กับ a ได้

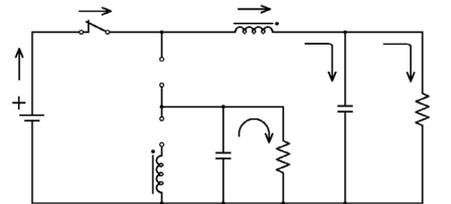
$$D = \frac{V_{OUT,M} \cdot a}{((1+a) \cdot V_{IN}) - V_{OUT,M}} \quad (7)$$

2.2.2 การทำงานของวงจร

การทำงานของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์แบบลอยตัว แบ่งออกได้เป็น 2 โหมด คือ โหมดแรก คือ ช่วงที่สวิตช์นำกระแส โหมดที่สองคือ ช่วงที่สวิตช์หยุดนำกระแส ซึ่งสามารถอธิบายการทำงานได้ดังนี้

โหมดที่ 1 สวิตช์นำกระแส

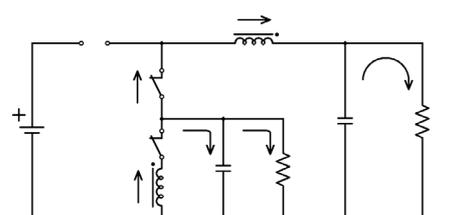
แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขาเข้า V_{IN} จ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านสวิตช์ S_1 ไปยังขดปฐมภูมิของหม้อแปลง T_1 ซึ่งหม้อแปลงก็จะสะสมพลังงานเอาไว้ ทั้งในขด L_1 และ L_2 ตัวเก็บประจุ C_M จะทำการอัดประจุและคงแรงดันไฟฟ้าให้กับตัวต้านทานโหลดหลัก R_M ในขณะที่ตัวเก็บประจุ C_A จะคายประจุเพื่อจ่ายให้กับตัวต้านทานโหลดช่วย R_A ดังรูปที่ 3



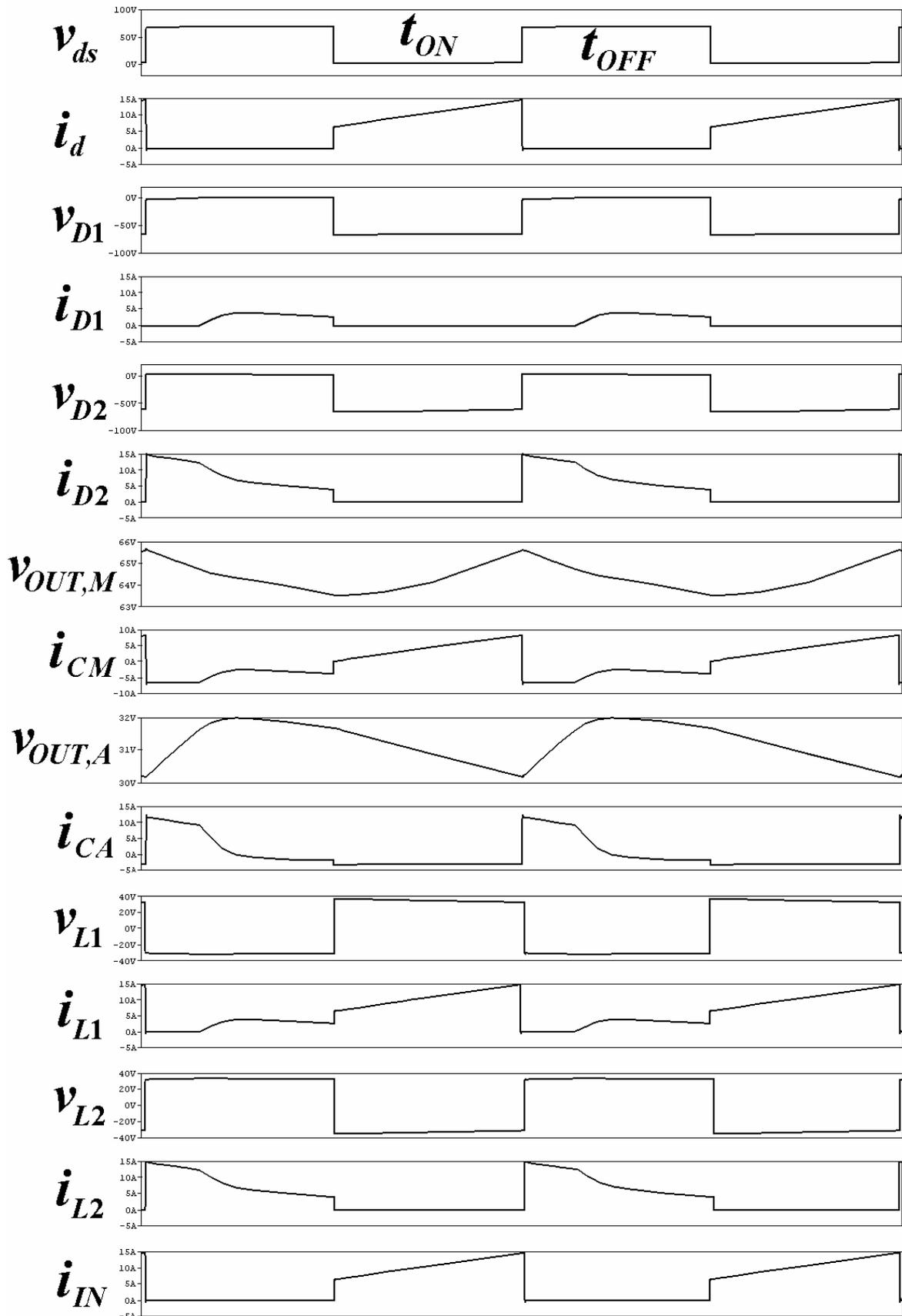
รูปที่ 3 การทำงานของวงจรในโหมดที่ 1

โหมดที่ 2 สวิตช์หยุดนำกระแส

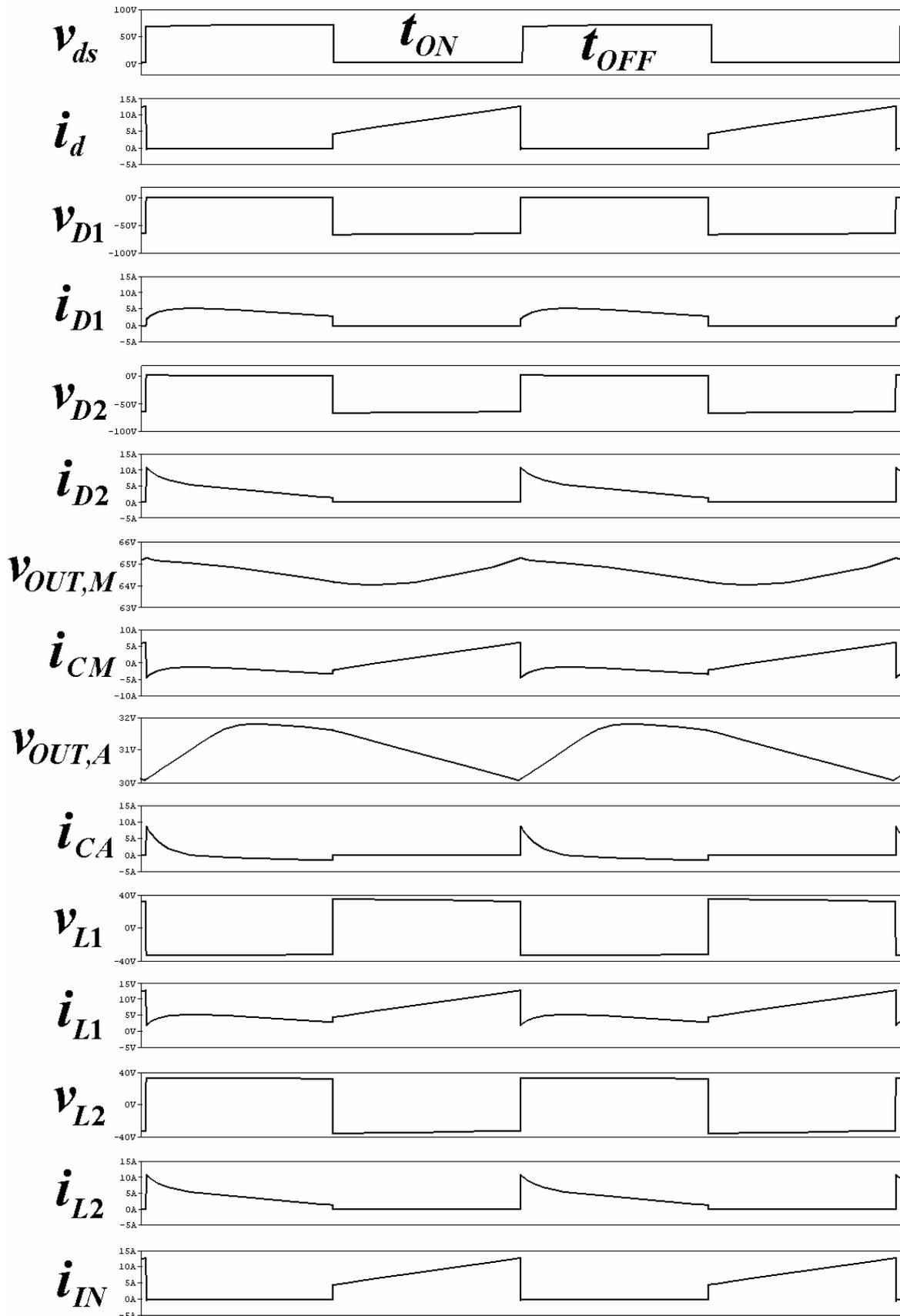
ในโหมดนี้สวิตช์ S_1 จะหยุดนำกระแส ทำให้แหล่งจ่ายไฟฟ้าถูกตัดออกจากระบบ ขดปฐมภูมิ L_1 และตัวเก็บประจุ C_M จะคายพลังงานและคายประจุเพื่อช่วยกันจ่ายตัวต้านทานโหลดหลัก R_M ขณะเดียวกันขดทุติยภูมิ L_2 ก็จะทำให้อัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ C_A เพื่อเอาไว้จ่ายให้ตัวต้านทานโหลดช่วย R_A ในโหมดถัดไป



รูปที่ 4 การทำงานของวงจรในโหมดที่ 2



รูปที่ 5 รูปคลื่นแรงดันและกระแสในส่วนต่างๆ ของวงจร เมื่อต่อตัวต้านทานโหลด 2 ตัว



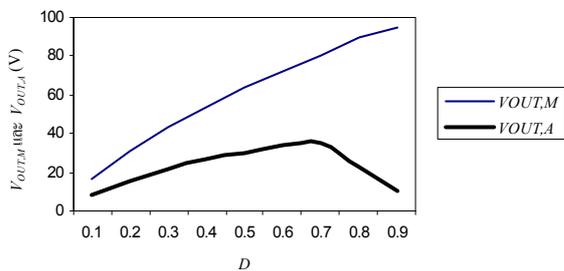
รูปที่ 6 รูปคลื่นแรงดันและกระแสในส่วนต่างๆ ของวงจร เมื่อต่อตัวต้านทานโหลดตัวเดียว

3. การวิเคราะห์การทำงานของวงจร

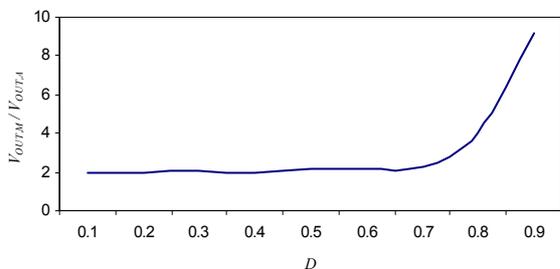
จากหลักการ และทฤษฎีที่กล่าวมาข้างต้น สามารถนำไปออกแบบวงจรต้นแบบ เพื่อศึกษาคุณลักษณะการทำงานที่สถานะคงที่ การใช้งานทำได้ 2 ลักษณะคือ การต่อตัวต้านทานโหลดทั้งแบบตัวเดียวและสองตัว

3.1 การต่อตัวต้านทานโหลด 2 ตัว

ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง $V_{IN} = 100 \text{ V}$, อัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลง $a = 1$, โดยกำหนดให้ค่าความเหนี่ยวนำของขดปฐมภูมิ และขดทุติยภูมิของหม้อแปลง $L_1 = L_2 = 10 \text{ } \mu\text{H}$, ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ $C_M = C_A = 10 \text{ } \mu\text{F}$, ค่าความต้านทานของโหลด $R_M = R_A = 10 \text{ } \Omega$ อุปกรณ์สวิตซิงทำงานที่ความถี่ 100 kHz รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ได้จากการจำลองแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของแรงดันขาออก $V_{OUT,M}$ และ $V_{OUT,A}$ กับดิวตี้ไซเคิล D เมื่อ $R_M = R_A = 10 \text{ } \Omega$ และ $a = 1$

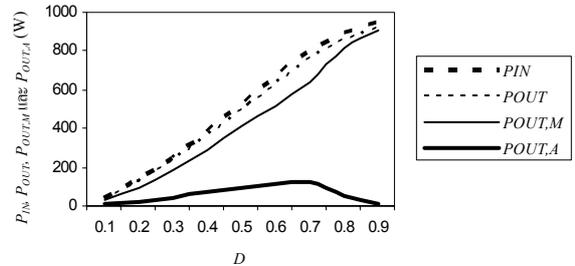


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงดันขาออก $V_{OUT,M}/V_{OUT,A}$ กับดิวตี้ไซเคิล D เมื่อ $R_M = R_A = 10 \text{ } \Omega$ และ $a = 1$

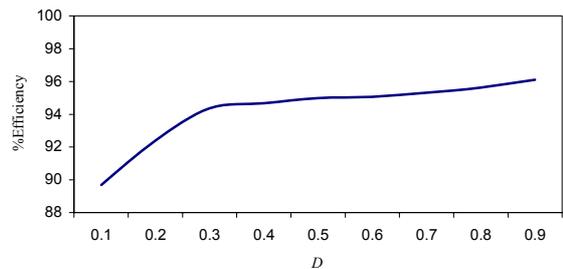
เมื่อทำการปรับค่าดิวตี้ไซเคิล D เพื่อดูความสัมพันธ์ของแรงดันขาออก $V_{OUT,M}$ และ $V_{OUT,A}$ กับดิวตี้ไซเคิล D และอัตราส่วนแรงดันขาออก $V_{OUT,M}/V_{OUT,A}$ กับดิวตี้ไซเคิล D จะได้ผลดังรูปที่ 7 และ 8 ซึ่งหมายความว่า วงจรนี้สามารถใช้งานได้ดีถึงดิวตี้ไซเคิลประมาณ 0.7 อัตราส่วนแรงดันขาออก $V_{OUT,M}/V_{OUT,A}$ จะมีค่าประมาณ 2 เท่า แต่ถ้าเปลี่ยนดิวตี้ไซเคิลเกินกว่า 0.7 จะทำให้แรงดันขาออกช่วย $V_{OUT,A}$ มีค่าลดลง ซึ่งทำให้แรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์สวิตซิงมีค่าสูงขึ้นจึงไม่เหมาะกับการที่ใช้แรงดันสูง

หากทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของกำลังไฟฟ้าดังรูปที่ 9 จะพบว่าที่ดิวตี้ไซเคิลสูงกว่า 0.7 กำลังไฟฟ้าขาออกที่โหลดช่วย $P_{OUT,A}$

จะลดลง เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าขาออกช่วย $V_{OUT,A}$ มีค่าลดลง ทำให้กำลังไฟฟ้าขาออกรวม $P_{OUT} = P_{OUT,M} + P_{OUT,A}$ ที่ได้เกือบทั้งหมดมาจาก $P_{OUT,M}$ และเมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพรวมของระบบพบว่าประสิทธิภาพของระบบรวมจะสูงขึ้น เมื่อเพิ่มดิวตี้ไซเคิลดังรูปที่ 10 ทั้งนี้เนื่องมาจากระยะเวลาในการคายพลังงานของ L_1 และ L_2 ลดลง ทำให้กำลังสูญเสียที่เกิดจากการคายพลังงานมีค่าลดลงตามไปด้วย

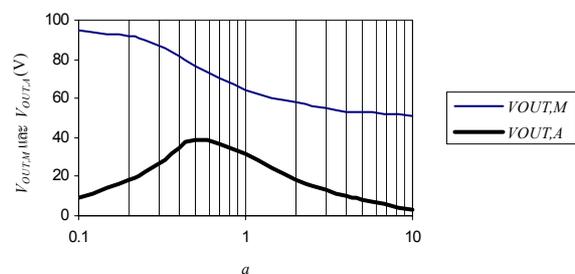


รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้า P_{IN} , P_{OUT} , $P_{OUT,M}$ และ $P_{OUT,A}$ กับดิวตี้ไซเคิล D เมื่อ $R_M = R_A = 10 \text{ } \Omega$ และ $a = 1$



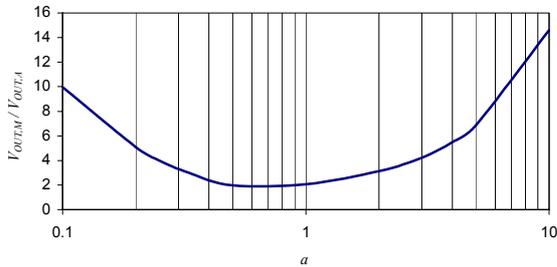
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพของวงจร กับดิวตี้ไซเคิล D เมื่อ $R_M = R_A = 10 \text{ } \Omega$ และ $a = 1$

รูปที่ 11 เป็นการทดลองปรับค่าอัตราส่วนจำนวนรอบ a เพื่อหาความสัมพันธ์ของแรงดันขาออก $V_{OUT,M}$ และ $V_{OUT,A}$ กับอัตราส่วนจำนวนรอบ a ซึ่งพบว่าแรงดันไฟฟ้าขาออกช่วย $V_{OUT,A}$ จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อ a เพิ่มขึ้น จนถึงค่า a ประมาณ 0.5 แรงดันไฟฟ้าขาออกช่วย $V_{OUT,A}$ จะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าขาออกหลัก $V_{OUT,M}$ จะมีค่าลดลง เมื่อค่า a เพิ่มขึ้น

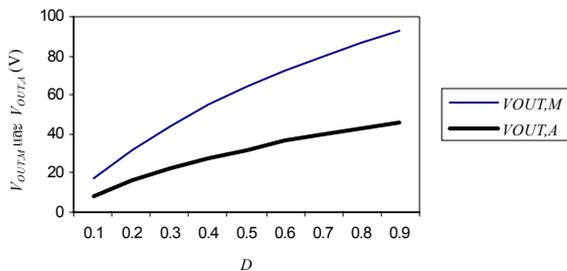


รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ของแรงดันขาออก $V_{OUT,M}$ และ $V_{OUT,A}$ กับอัตราส่วนจำนวนรอบ a ของหม้อแปลง เมื่อ $R_M = R_A = 10 \text{ } \Omega$

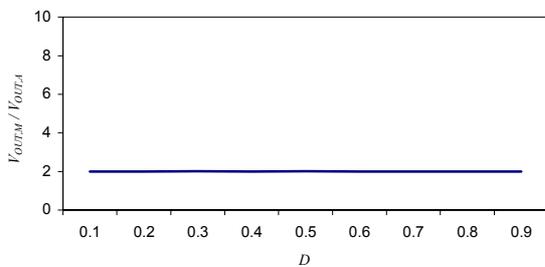
รูปที่ 12 เป็นความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงดันขาออก $V_{OUT,M}/V_{OUT,A}$ กับอัตราส่วนจำนวนรอบ a พบว่าอัตราส่วนแรงดันขาออกจะมีค่าต่ำสุดประมาณ 2 เมื่อ a มีค่าอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 1.5 และจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อ a มีค่าสูงขึ้นและต่ำลงกว่าช่วงดังกล่าว



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงดันขาออก $V_{OUT,M}/V_{OUT,A}$ กับอัตราส่วนจำนวนรอบ a ของหม้อแปลง เมื่อ $R_M = R_A = 10 \Omega$



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ของแรงดันขาออก $V_{OUT,M}$ และ $V_{OUT,A}$ กับดิวตี้ไซเคิล D เมื่อ $R_M = 10 \Omega$, $R_A \approx \infty$ และ $a = 1$

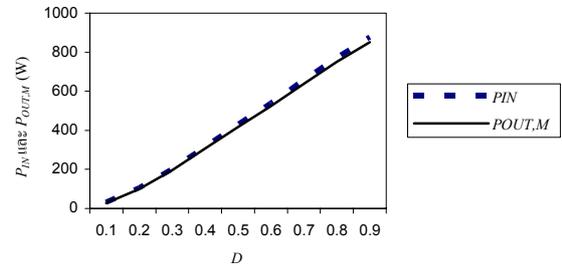


รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงดันขาออก $V_{OUT,M}/V_{OUT,A}$ กับดิวตี้ไซเคิล D เมื่อ $R_M = 10 \Omega$, $R_A \approx \infty$ และ $a = 1$

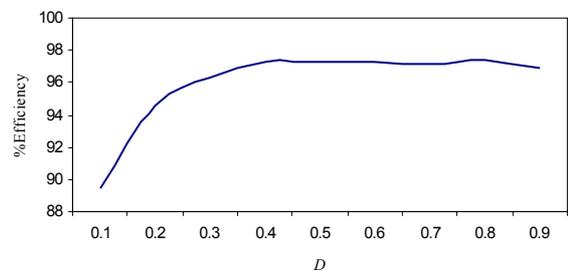
3.2 การต่อตัวต้านทานโหลดตัวเดียว

ในการใช้งานส่วนใหญ่ ผู้ใช้อาจต้องการใช้งานแบบโหลดหลัก R_M เพียงตัวเดียว ซึ่งสามารถทำได้โดยการเปิดวงจรที่ตำแหน่งโหลดช่วย R_A หรือทำให้ R_A มีค่าเข้าใกล้อนันต์ ($R_A \approx \infty$) ซึ่งรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ได้จากการจำลองแสดงในรูปที่ 6 ส่วนรูปที่ 13 และ 14 เป็นตัวอย่างของการใช้งานดังกล่าว คือไม่ว่าจะใช้งานที่ค่าดิวตี้ไซเคิล D เท่าไรก็ตาม จะยังคงทำให้อัตราส่วนแรงดันขาออก $V_{OUT,M}/V_{OUT,A}$ มีค่าเท่ากับ 2 เสมอ หากทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของกำลังไฟฟ้า

ดังรูปที่ 15 จะพบว่าที่ดิวตี้ไซเคิลสูงขึ้นเรื่อยๆ กำลังไฟฟ้าขาออกที่โหลด $P_{OUT,M}$ ก็จะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับกับ P_{IN} และเมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบ พบว่าประสิทธิภาพของระบบรวมจะมีค่าค่อนข้างคงที่ เมื่อดิวตี้ไซเคิลมีค่ามากกว่า 0.4 ดังรูปที่ 16



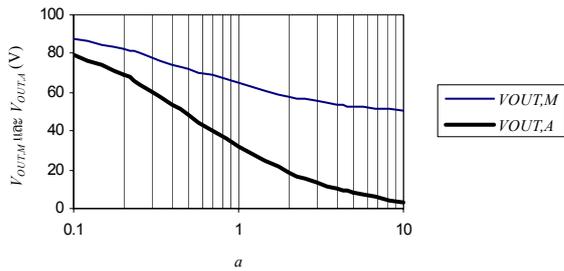
รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้า P_{IN} , P_{OUT} , $P_{OUT,M}$ และ $P_{OUT,A}$ กับดิวตี้ไซเคิล D เมื่อ $R_M = 10 \Omega$, $R_A \approx \infty$ และ $a = 1$



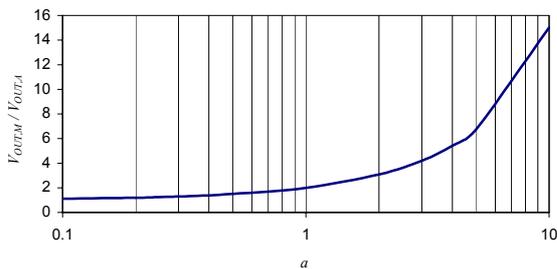
รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพของวงจร กับดิวตี้ไซเคิล D เมื่อ $R_M = 10 \Omega$, $R_A \approx \infty$ และ $a = 1$

และเมื่อทำการทดลองปรับค่าอัตราส่วนจำนวนรอบ a เพื่อหาความสัมพันธ์ของแรงดันขาออก $V_{OUT,M}$ และ $V_{OUT,A}$ เทียบกับอัตราส่วนจำนวนรอบ a โดยทำการเปิดวงจรที่โหลด R_A พบว่ากำลังไฟฟ้าขาออกทั้งสองมีค่าจะลดลง เมื่ออัตราส่วนจำนวนรอบ a มีค่าเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 17 ซึ่งก็เป็นไปตามหลักการลดระดับแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงทั่วไป

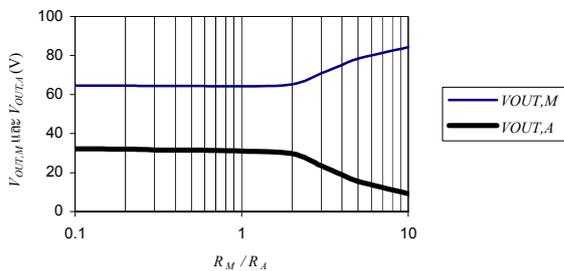
ในขณะที่เมื่อทำการปรับค่าอัตราส่วนจำนวนรอบ a ดังรูปที่ 18 มีผลทำให้อัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าขาออก $V_{OUT,M}/V_{OUT,A}$ มีค่าไม่คงที่เหมือนการปรับค่าดิวตี้ไซเคิล D ส่วนรูปที่ 19 และ 20 แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันขาออก $V_{OUT,M}$ และ $V_{OUT,A}$ กับอัตราส่วนค่าความต้านทานโหลด R_M/R_A เมื่ออัตราส่วนจำนวนรอบ $a=1$ และดิวตี้ไซเคิล $D=0.5$ ซึ่งหมายความว่า หากอัตราส่วนค่าความต้านทานโหลด R_M/R_A มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 ก็คือ ค่า $R_M \leq R_A$ จะทำให้แรงดันขาออก $V_{OUT,M}$ มีค่าเป็น 2 เท่าของ $V_{OUT,A}$ เสมอ แต่ถ้าทำให้ $R_M > R_A$ ก็จะทำให้อัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าขาออก $V_{OUT,M}/V_{OUT,A}$ มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากมาย อย่างไรก็ตามผลรวมของแรงดันไฟฟ้าขาออก ($V_{OUT,M} + V_{OUT,A}$) ที่ได้จะไม่ต่างมากกว่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้า V_{IN} เนื่องจากวงจรนี้เป็นการลดระดับแรงดันไฟฟ้า



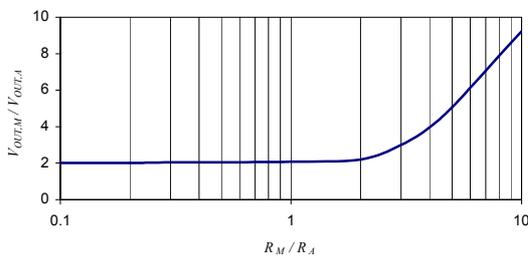
รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ของแรงดันขาออก $V_{OUT,M}$ และ $V_{OUT,A}$ กับ อัตราส่วนจำนวนรอบ a ของหม้อแปลง เมื่อ $R_M = 10 \Omega$, $R_A \approx \infty$



รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงดันขาออก $V_{OUT,M}/V_{OUT,A}$ กับอัตราส่วนจำนวนรอบ a ของหม้อแปลง เมื่อ $R_M = 10 \Omega$, $R_A \approx \infty$



รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ของแรงดันขาออก $V_{OUT,M}$ และ $V_{OUT,A}$ กับ อัตราส่วนค่าความต้านทานโหลด R_M/R_A เมื่อ $a=1$ และ $D=0.5$



รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงดันขาออก $V_{OUT,M}/V_{OUT,A}$ กับ อัตราส่วนค่าความต้านทานโหลด R_M/R_A เมื่อ $a=1$ และ $D=0.5$

4. บทสรุป

บทความนี้ได้เสนอวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า แบบลดระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง หรือวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ ที่ใช้เทคนิคการลอยตัวแรงดันไฟฟ้า ซึ่งมีข้อดีคือ สามารถลดแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ได้ โดยอาศัยการเก็บพลังงานไว้ที่ขดปฐมภูมิของหม้อแปลง ในขณะที่สวิตช์นำกระแส ภายในบทความยังได้อธิบายถึงหลักการ วิธีการออกแบบ รวมทั้งการวิเคราะห์การทำงานที่สถานะคงที่ โดยใช้ผลการจำลองวงจรในลักษณะต่างๆ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในการนำวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์แบบลอยตัวไปใช้งาน จะสามารถทำได้ในสองลักษณะคือ ต่อตัวต้านทานโหลดสองตัว และต่อตัวต้านทานโหลดตัวเดียวเหมือนกรณีบัคคอนเวอร์เตอร์แบบทั่วไป ซึ่งผู้ออกแบบจะต้องคำนึงถึงการใช้งานเป็นสำคัญ เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลดทั้งสองนั้นมีค่าต่างกันค่อนข้างมาก ในขณะที่อัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงก็มีผลค่อนข้างมากต่อแรงดันไฟฟ้าขาออกที่ตัวไดโอดต่างๆ กัน และประสิทธิภาพในการทำงานของวงจรรวมนั้นก็ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ คือ ตัวไดโอด ซึ่งในบทความนี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบ และวิเคราะห์คุณลักษณะการทำงานของวงจรนี้ เพื่อเป็นทางเลือกในการประยุกต์ใช้งานวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ และเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอื่นๆ ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Ang, A. Oliva. **Power-Switching Converters**. 2nd ed., CRC Press, 2005.
- [2] C. K. Tse. **Complex Behavior of Switching Power Converters**. CRC Press, 2004.
- [3] S. L. Herman. **Electronics for Industrial Electricians**. 3rd ed. Delmar Publishers, 1995.
- [4] F. L. Luo, H. Ye, M. H. Rashid. **Digital Power Electronics and Applications**. Elsevier Academic Press, 2005.
- [5] A. Emadi, A. Nasiri, S. B. Bekiarov. **Uninterruptible Power Supplies and Active Filters**. CRC Press, 2005.
- [6] C. P. Basso. **Switch-Mode Power Supply Spice Cookbook**. McGraw-Hill, 2001.
- [7] M. K. Kazimierczuk, D. Czarkowski. **Resonant Power Converters**. John Wiley & Sons, 1995.
- [8] M. H. Rashid. **Power Electronics Circuits, Devices, and Applications**. Prentice Hall. 2004.
- [9] W. Shepherd, L. Zhang. **Power Converter Circuits**. Marcel Dekker. 2004.
- [10] S. Maniktala. **Switching Power Supply Design & Optimization**. McGraw-Hill, 2004.