

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 36

The 36th Electrical Engineering Conference (EECON 36)

11-13 ธันวาคม 2556

ณ เฟลิกซ์ ริเวอร์แคว รีสอร์ท จ.กาญจนบุรี



มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
Kasetsart University
พ.ศ. 2485-2558

Volume 1

(PW) ไฟฟ้ากำลัง

(PE) อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

Electrical Engineering Dept.

Faculty of Engineering

Kasetsart University

50 Ngamwongwan Road-Latyaoo

Chatuchak Bangkok 10900

Tel: 02-797-0999 ext 1503, 1504

Fax: 02-579-7566



การวิเคราะห์วงจรซอฟต์แวร์สวิตชิ่งบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว

Analysis of Soft-Switching Boost DC-DC Converter Using a Single Switch

ยงยุทธ นารายณ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม

38 ถ.เพชรเกษม ภาษีเจริญ กรุงเทพมหานคร 10160 โทรศัพท์: 02-4570068 ต่อ 5122 E-Mail: yongyuth.nar@siam.edu

PE015

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอรายละเอียดการวิเคราะห์การทำงานของวงจรซอฟต์แวร์สวิตชิ่งบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้อุปกรณ์สวิตช์ตัวเดียว อุปกรณ์สวิตช์ในคอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอเริ่มนำกระแสภายใต้สภาวะ ZCS และเริ่มหยุดนำกระแสภายใต้สภาวะ ZVS โดยอาศัยวงจรช่วยที่ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ ตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ และไดโอด โหมดต่างๆ ที่แสดงการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอได้ถูกวิเคราะห์ไว้อย่างละเอียด ผลการจำลองแบบของคลื่นแรงดันและกระแสที่อุปกรณ์สวิตช์ได้ถูกนำเสนอเพื่อยืนยันความถูกต้องของการวิเคราะห์ในทางทฤษฎี

คำสำคัญ: บูสต์คอนเวอร์เตอร์, การสวิตช์ขณะแรงดันเป็นศูนย์, การสวิตช์ขณะกระแสเป็นศูนย์

Abstract

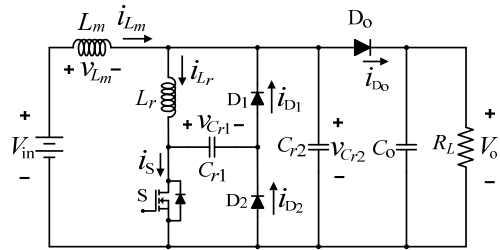
This paper presents a detailed analysis of circuit operation of a soft-switching boost DC-DC converter using a single switch. The switch in the proposed converter is turned on under zero current switching (ZCS) condition and turned off under zero voltage switching (ZVS) condition by using an auxiliary circuit with a resonant inductor, resonant capacitor, and diode. A variety of modes of circuit operation of the converter are analyzed in details. Simulation results of the voltage and current waveforms of the switches are presented to verify the theoretical analysis.

Keywords: Boost Converter, ZVS, ZCS

1. บทนำ

วงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ขณะทำงานที่ความถี่สูง ทำให้มีกำลังสูญเสียเนื่องจากการสวิตช์ (Switching Losses) มีค่าสูงขึ้นตามความถี่ที่ปรับเพิ่มขึ้นถ้าอุปกรณ์สวิตช์ทำงานเป็นแบบฮาร์ดสวิตชิ่ง ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของวงจรต่ำลง [1]-[3] ดังนั้นเพื่อลดกำลังสูญเสียเนื่องจากการสวิตช์ดังกล่าวนี้สามารถทำได้โดยการควบคุมให้อุปกรณ์สวิตช์ทำงานเป็นแบบซอฟต์แวร์สวิตชิ่งหรือทำงานภายใต้สภาวะ ZVS หรือ ZCS นั่นเอง วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอในบทความนี้แสดงได้ดังรูปที่ 1 ซึ่งสามารถทำงานเป็นแบบซอฟต์แวร์สวิตชิ่งโดยใช้อุปกรณ์สวิตช์

เพียงตัวเดียวร่วมกับวงจรช่วยที่ประกอบด้วยตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ C_{r1} และ C_{r2} ตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ L_r และไดโอด D_1, D_2



รูปที่ 1 ซอฟต์แวร์สวิตชิ่งบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอ

ในบทความนี้ได้แสดงการวิเคราะห์โหมดการทำงานของวงจรภายในหนึ่งไซเคิลของการสวิตช์ขณะวงจรทำงานเป็นแบบซอฟต์แวร์สวิตชิ่งเพื่อให้เข้าใจการทำงานของวงจร ซึ่งจะเป็นประโยชน์สำหรับผู้ออกแบบใช้งานผลการวิเคราะห์วงจรในโหมดต่างๆ สามารถนำไปสู่การวิเคราะห์หาสมการแรงดันเอาต์พุตได้

2. การวิเคราะห์วงจรพร้อมคลื่นจากการจำลองแบบ

2.1 โหมดการทำงานของวงจร

วงจรแสดงการทำงานในโหมดต่างๆ ในหนึ่งไซเคิลของการสวิตช์ที่สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งหมด 8 โหมดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2 และลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ในบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 โดยในแต่ละโหมดมีการทำงานของวงจรดังนี้

โหมด 1 ($0 \leq t \leq t_1$)

การทำงานในโหมดนี้เริ่มต้นด้วยสวิตช์มอสเฟต S เริ่มนำกระแสภายใต้สภาวะกระแสเป็นศูนย์ (ZCS) โดยอาศัยกระแสเริ่มต้นของตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ (L_r) ในโหมดนี้ กระแสในตัวเหนี่ยวนำหลัก (L_m) ไหลผ่านไดโอด D_o ไปยังเอาต์พุตมีค่าลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นต่อเนื่องจากโหมด 8 ดังสมการ

$$i_{L_m} = i_{L_m}(t_8) + \frac{V_{in} - V_o}{L_m} t \quad (1)$$

กระแสที่ไหลในตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ที่มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นดังสมการ

$$i_{L_r} = \frac{V_o}{L_r} t \quad (2)$$

การทำงานในโหมดนี้สิ้นสุดลงเมื่อกระแสที่ไหลในตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์มีค่าเพิ่มขึ้นจนเท่ากับกระแสที่ไหลในตัวเหนี่ยวนำหลักทำให้ไดโอด D_o หยุดนำกระแส ซึ่งที่เวลานี้ค่ากระแส $i_{L_m} \approx I_{L_m, \min}$ ดังนั้นเมื่อสิ้นสุดโหมดนี้จึงใช้เวลาเป็นไปตามสมการ

$$t_1 = \frac{L_r}{V_o} I_{L_m, \min} \quad (3)$$

โหมด 2 ($t_1 \leq t \leq t_2$)

การทำงานในโหมดนี้เริ่มต้นขึ้นเมื่อไดโอด D_o เริ่มหยุดนำกระแสที่เวลา t_1 ตัวเก็บประจุ C_{r2} และตัวเหนี่ยวนำ L_r เริ่มเกิดการเรโซแนนซ์ กระแสที่ไหลในตัวเหนี่ยวนำหลักมีค่าประมาณคงที่เท่ากับค่าต่ำสุด

$$i_{L_m} \approx I_{L_m, \min} \quad (4)$$

แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ C_{r2} มีค่าลดลงดังสมการ

$$v_{C_{r2}} = V_o \cos \omega_{r2} t \quad (5)$$

โดยที่ $\omega_{r2} = \frac{1}{\sqrt{L_r C_{r2}}}$

โหมดนี้สิ้นสุดลงเมื่อค่าแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ ($v_{C_{r2}}$) ลดลงจนเป็นศูนย์ ดังนั้นเมื่อสิ้นสุดโหมดนี้จึงใช้เวลาเป็นไปตามสมการ

$$t_2 = \frac{\pi}{2\omega_{r2}} + t_1 \quad (6)$$

โหมด 3 ($t_2 \leq t \leq t_3$)

การทำงานในโหมดนี้เริ่มต้นขึ้นเมื่อค่าแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ C_{r2} ลดลงเป็นศูนย์ ไดโอดฟรีวีลิ่ง D_1 และ D_2 เริ่มนำกระแสภายใต้สภาวะแรงดันเป็นศูนย์ (ZVS) และกระแสที่ไหลในตัวเหนี่ยวนำหลักมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นดังสมการ

$$i_{L_m} = I_{L_m, \min} + \frac{V_{in}}{L_m} t \quad (7)$$

การทำงานในโหมดนี้สิ้นสุดลงที่เวลา DT_s

โหมด 4 ($t_3 \leq t \leq t_4$)

การทำงานในโหมดนี้เริ่มต้นด้วยสวิตช์มอสเฟต S และไดโอด D_2 เริ่มหยุดนำกระแสภายใต้สภาวะแรงดันเป็นศูนย์ (ZVS) โดยอาศัยตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ C_{r1} และ C_{r2} ในโหมดนี้กระแสที่ไหลในตัวเหนี่ยวนำหลักมีค่าประมาณคงที่เท่ากับค่าสูงสุด

$$i_{L_m} \approx I_{L_m, \max} \quad (8)$$

ตัวเก็บประจุ C_{r2} ถูกชาร์จด้วยกระแสจากตัวเหนี่ยวนำหลักซึ่งมีค่าคงที่ประมาณเท่ากับ $I_{L_m, \max}$ จึงทำให้แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุนี้มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นดังสมการ

$$v_{C_{r2}} = \frac{I_{L_m, \max}}{C_{r2}} t \quad (9)$$

แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์นี้มีค่าเท่ากับแรงดันเอาต์พุตเมื่อสิ้นสุดการทำงานในโหมดนี้

$$v_{C_{r2}}(t_4) = V_o \quad (10)$$

ดังนั้นเมื่อสิ้นสุดโหมดนี้จึงใช้เวลาเป็นไปตามสมการ

$$t_4 = \frac{V_o C_{r2}}{I_{L_m, \max}} + DT_s \quad (11)$$

ในโหมดนี้เกิดการเรโซแนนซ์ของตัวเก็บประจุ C_{r1} และตัวเหนี่ยวนำ L_r ทำให้แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ C_{r1} มีค่าดังสมการ

$$v_{C_{r1}} = Z_{r1} I_{L_r, \max} \sin \omega_{r1} t \quad (12)$$

โดยที่

$$\omega_{r1} = \frac{1}{\sqrt{L_r C_{r1}}} \text{ และ } Z_{r1} = \sqrt{\frac{L_r}{C_{r1}}}$$

โหมด 5 ($t_4 \leq t \leq t_5$)

การทำงานในโหมดนี้เริ่มต้นขึ้นเมื่อแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ C_{r2} มีค่าเท่ากับแรงดันเอาต์พุต กระแสในตัวเหนี่ยวนำหลักไหลผ่านไดโอด D_o ไปยังเอาต์พุต กระแสที่ไหลในตัวเหนี่ยวนำหลักมีค่าลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นดังสมการ

$$i_{L_m} = I_{L_m, \max} + \frac{V_{in} - V_o}{L_m} t \quad (13)$$

การทำงานในโหมดนี้สิ้นสุดลงเมื่อ $i_{L_r} = 0$ และไดโอดฟรีวีลิ่ง D_1 เริ่มหยุดนำกระแสขณะกระแสเป็นศูนย์ (ZCS)

โหมด 6 ($t_5 \leq t \leq t_6$)

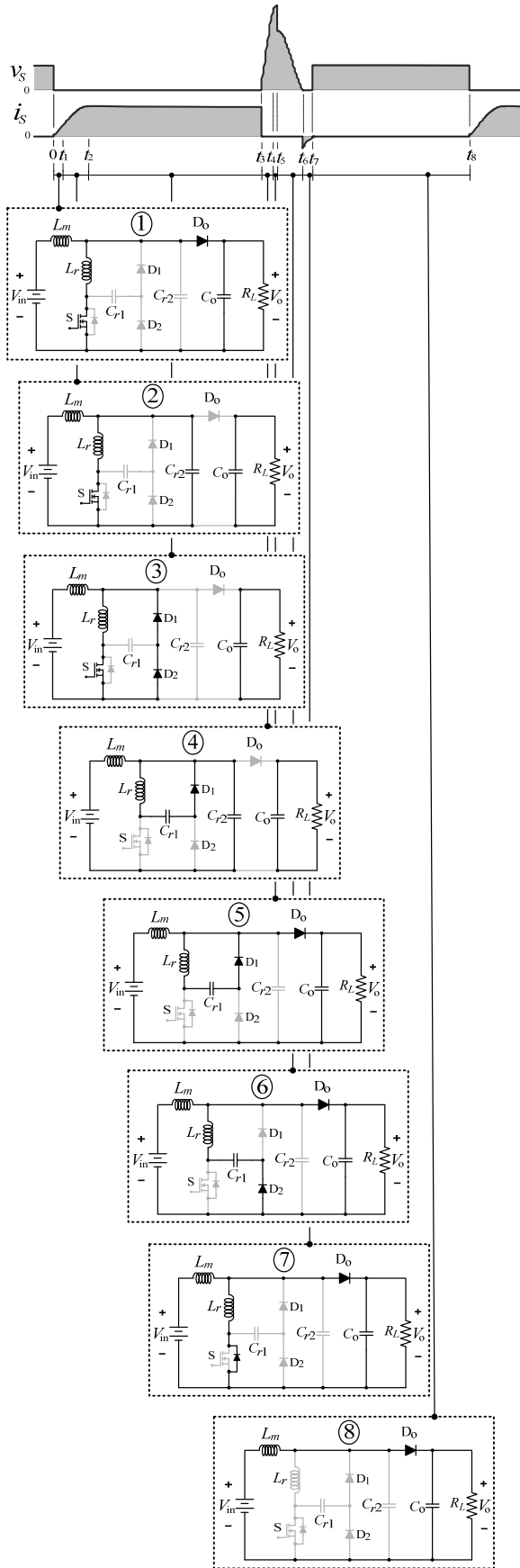
ในโหมดนี้สวิตช์มอสเฟต S ยังคงหยุดนำกระแส และกระแสในตัวเหนี่ยวนำหลักไหลผ่านไดโอด D_o ไปยังเอาต์พุตโดยมีค่าลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นต่อเนื่องจากโหมด 5 ดังสมการ

$$i_{L_m} = i_{L_m}(t_5) + \frac{V_{in} - V_o}{L_m} t \quad (14)$$

การทำงานในโหมดนี้สิ้นสุดลงเมื่อแรงดัน $v_{C_{r1}}$ ลดลงเป็นศูนย์

โหมด 7 ($t_6 \leq t \leq t_7$)

การทำงานในโหมดนี้เริ่มต้นขึ้นเมื่อแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ C_{r1} มีค่าลดลงเป็นศูนย์ ในขณะที่กระแส i_{L_r} ยังคงมีค่าเป็น

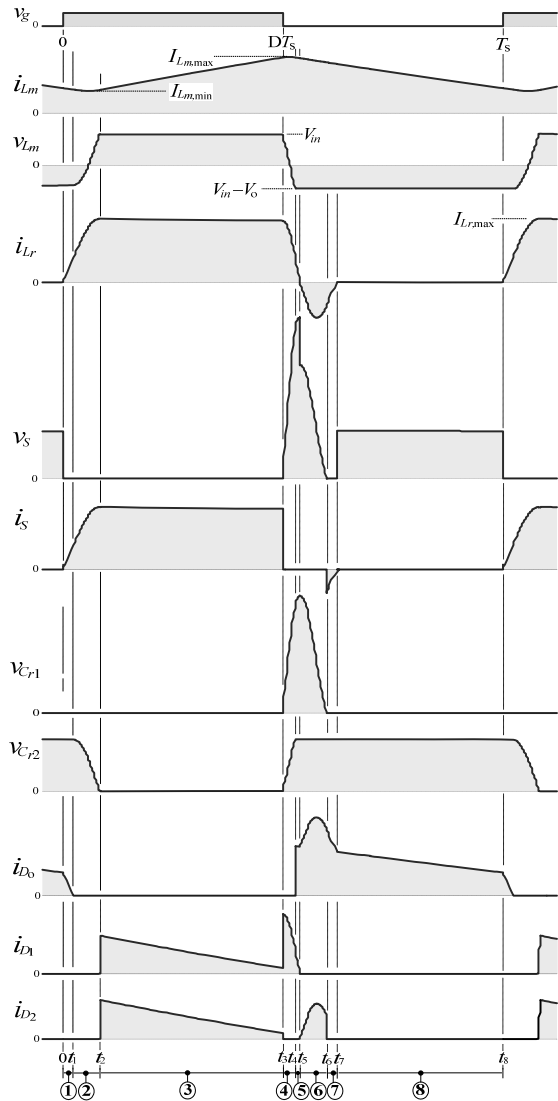


รูปที่ 2 วงจรแสดงการทำงานในโหมดต่างๆ ของคอนเวอร์เตอร์

ลบ ดังนั้นกระแส i_{L_r} จึงถูกเปลี่ยนถ่ายจากไดโอด D_2 ไปยังไดโอดภายในของสวิตช์มอสเฟตแทน สำหรับโหมดนี้กระแสในตัวเหนี่ยวนำหลักยังคงลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นต่อเนื่องจากโหมด 6 ดังสมการ

$$i_{L_m} = i_{L_m}(t_6) + \frac{V_{in} - V_o}{L_m} t \quad (15)$$

การทำงานในโหมดนี้สิ้นสุดเมื่อ $i_{L_r} = 0$ และไดโอดภายในของสวิตช์มอสเฟตเริ่มหยุดนำกระแสภายใต้สภาวะกระแสเป็นศูนย์ (ZCS)



รูปที่ 3 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ของคอนเวอร์เตอร์

โหมด 8 ($t_7 \leq t \leq T_s$)

ในโหมดนี้สวิตช์มอสเฟต S ยังคงอยู่ในสภาวะหยุดนำกระแสและกระแสในตัวเหนี่ยวนำหลักไหลผ่านไดโอด D_0 ไปยังเอาต์พุตโดยมีค่าลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นต่อเนื่องจากโหมด 7 ดังสมการ

$$i_{L_m} = i_{L_m}(t_7) + \frac{V_{in} - V_o}{L_m} t \quad (16)$$

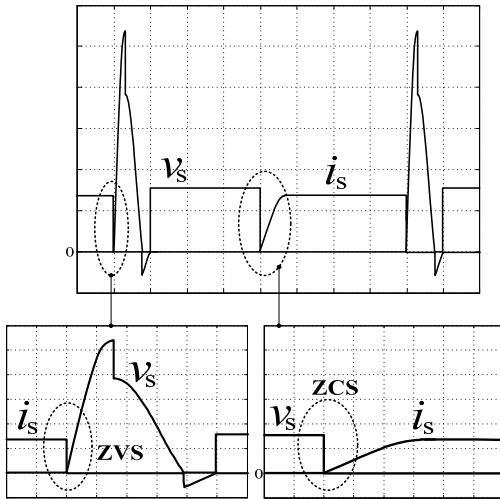
การทำงานในโหมดนี้สิ้นสุดลงที่ขอบขาขึ้นของสัญญาณควบคุมสวิตช์มอสเฟตที่เวลา T_s

2.2 คลื่นแรงดัน กระแสจากการจำลองแบบ

ทำการจำลองแบบการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอโดยอาศัยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในวงจรดังแสดงในตารางที่ 1 สามารถแสดงลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์มอสเฟตได้ดังรูปที่ 4 ซึ่งขยายให้เห็นการทำงานได้อย่างชัดเจนว่าสวิตช์นี้เริ่มนำกระแสภายใต้สภาวะ ZCS และเริ่มหยุดนำกระแสภายใต้สภาวะ ZVS

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองแบบ

แรงดันอินพุต (V_{in})	48 V
ความถี่สวิตช์ (f_s)	18 - 42 kHz
ตัวเหนี่ยวนำหลัก (L_m)	300 μ H
ตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนท์ (L_r)	20 μ H
ตัวเก็บประจุเรโซแนนท์ (C_{r1})	50 pF
ตัวเก็บประจุเรโซแนนท์ (C_{r2})	100 pF
โหลดความต้านทาน (R_L)	25 Ω



รูปที่ 4 คลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์มอสเฟต ซึ่งเริ่มนำกระแสภายใต้สภาวะ ZCS และเริ่มหยุดนำกระแสภายใต้สภาวะ ZVS

3. การวิเคราะห์หาแรงดันเอาต์พุต

ในช่วงเวลา t_2 ถึง DT_s ของการทำงานในโหมด 3 ค่ากระแสที่ไหลในตัวเหนี่ยวนำหลักเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นดังสมการ

$$\Delta L_{m,inc} = \frac{V_{in}}{L_m}(DT_s - t_2) \quad (17)$$

ในช่วงเวลา t_4 ถึง t_1 ของการทำงานในโหมด 5, 6, 7, 8 และ 1 ค่ากระแสที่ไหลในตัวเหนี่ยวนำหลักลดลงต่อเนื่องอย่างเป็นเชิงเส้นดังสมการ

$$\Delta L_{m,dec} = \frac{V_{in} - V_o}{L_m}(T_s + t_1 - t_4) \quad (18)$$

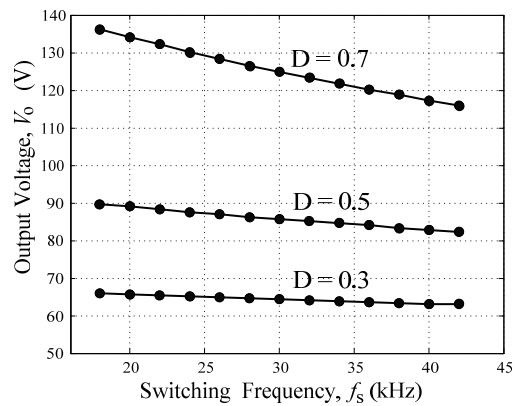
ผลรวมของการเปลี่ยนแปลงของกระแสในตัวเหนี่ยวนำเท่ากับศูนย์ [1], [2] ดังนั้นจะได้

$$\frac{V_{in} - V_o}{L_m}[(T_s - t_4) + t_1] + \frac{V_{in}}{L_m}(DT_s - t_2) = 0 \quad (19)$$

ดังนั้นจะได้ค่าแรงดันเอาต์พุตดังสมการ

$$V_o = V_{in} \left(1 + \frac{DT_s - t_2}{T_s + t_1 - t_4} \right) \quad (20)$$

ค่าแรงดันเอาต์พุตจากการจำลองแบบขณะปรับความถี่สวิตช์ซึ่งในย่าน 18-42 kHz ที่ค่าดีวีไอซ์เกิดเท่ากับ 0.3, 0.5 และ 0.7 สามารถแสดงได้ดังกราฟรูปที่ 6



รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเอาต์พุตเมื่อปรับความถี่สวิตช์

4. สรุป

จากผลการวิเคราะห์ที่นำเสนอในบทความนี้ สามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้

- (1) สวิตช์มอสเฟตเริ่มนำกระแสภายใต้สภาวะ ZCS โดยอาศัยตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนท์ และเริ่มหยุดนำกระแสภายใต้สภาวะ ZVS โดยอาศัยตัวเก็บประจุเรโซแนนท์
- (2) ไดโอดฟรียวลิ่งเริ่มนำกระแสภายใต้สภาวะ ZVS และเริ่มหยุดนำกระแสภายใต้สภาวะ ZCS
- (3) ที่ค่าดีวีไอซ์เกิดคงที่ใดๆ เมื่อปรับเพิ่มความถี่สวิตช์ ส่งผลทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลง นั่นหมายความว่าคอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอนี้สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตได้โดยการควบคุมที่ความถี่สวิตช์ได้ด้วย นอกเหนือจากการควบคุมด้วยค่าดีวีไอซ์เกิด

เอกสารอ้างอิง

- [1] Daniel W. Hart, **Introduction to Power Electronics**, Prentice-Hall, 1997.
- [2] S. C. Tripathy, **Power Electronics**, Alpha Science, 2008.
- [3] N. Jain, P. K. Jain and Joos, "A zero voltage transition boost converter employing a soft switching auxiliary circuit with reduced conduction losses," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, no. 1, pp. 130-139, 2004.