

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

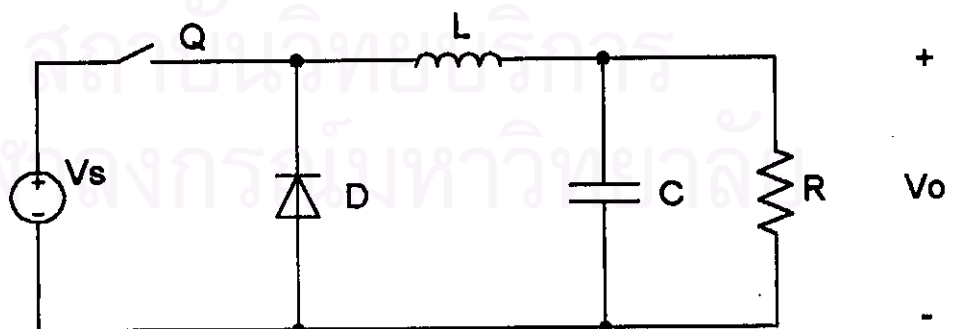
#### วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง

วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงทำหน้าที่แปลงผันปริมาณไฟตรงขาเข้า ให้เป็นปริมาณไฟตรงขาออก ซึ่งสามารถควบคุมค่าของกระแสและแรงดันได้ หลักการในการแปลงผันพลังงาน คือ การใช้สวิตช์ตัดต่อให้ได้รูปลักษณะของวงจร (configuration) ต่างกันในหนึ่งคาบของการสวิตช์ แล้วแต่ตำแหน่งสวิตช์และความซับซ้อนของวงจรเพื่อควบคุมการแปลงผันพลังงานไฟฟ้าระหว่างแหล่งและโหลด

วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงพื้นฐาน ได้แก่

- 1 วงจรทอนระดับ (Buck)
- 2 วงจรทบระดับ (Boost)
- 3 วงจรทอนทบระดับ (Buck-Boost)

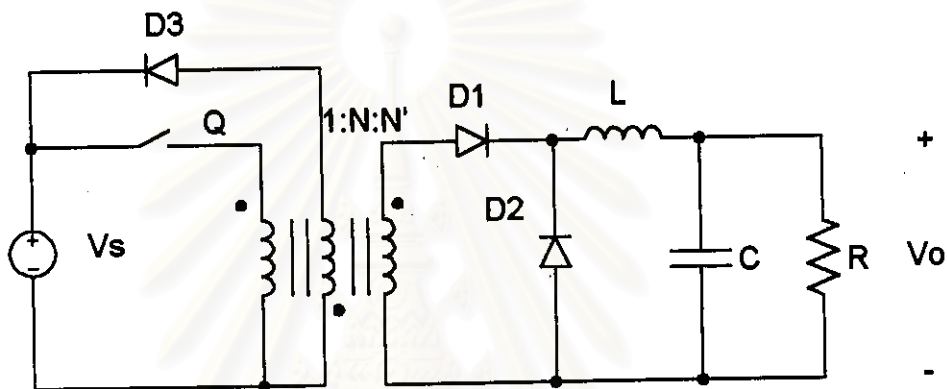
#### 1. วงจรทอนระดับ (Buck)



รูปที่ 2.1 วงจรทอนระดับ (Buck)

วงจรทอนระดับมีโครงสร้างของวงจรดังรูปที่ 2.1 โครงสร้างพื้นฐานประกอบด้วยกึ่งแรงดัน 1 กึ่งเป็นแหล่งแรงดัน ( $V_s$ ) และกึ่งกระแส 1 กึ่งเป็นตัวเหนี่ยวนำ ( $L$ ) อนุกรมกับกึ่งแรงดันด้านออก ( $V_o$ ) (กึ่ง  $V_o$  มักจะเป็นตัวเก็บประจุขนานกับความต้านทานซึ่งเป็นโหลด) ทำให้ได้แรงดันด้านออกที่ต่อเนื่อง พลังงานไหลจากกึ่งแรงดันที่เป็นแหล่งดันสู่กึ่งกระแสที่เป็นโหลด โดยมี อัตราการแปลงผันแรงดัน ( $V_o/V_s$ ) ที่เป็นฟังก์ชันของวัฏจักรงาน ( $D$ ) ตามสมการ ( $V_o/V_s$ ) =  $D$  (กรณีทอสมคทำงานในภาคกระแสไม่ต่อเนื่อง หรือ วงจรมีการสูญเสีย อัตราการแปลงผันขึ้นอยู่กัโหลด)

วงจรแปลงผันไปหน้า (Forward Converter)

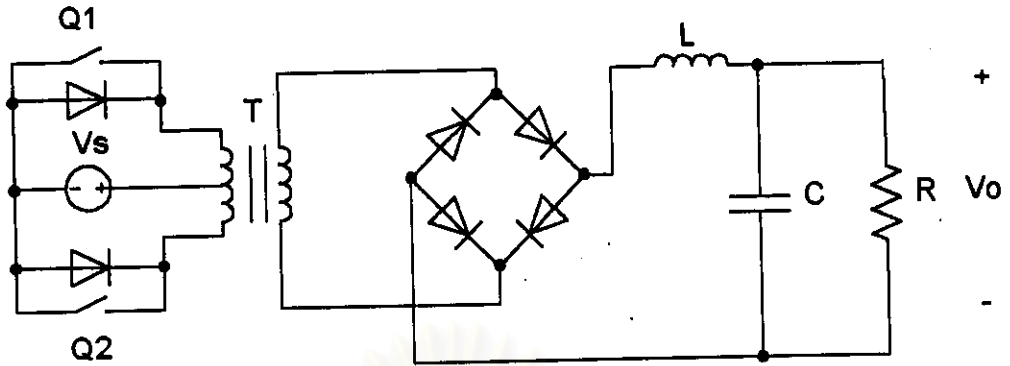


รูปที่ 2.2 วงจรแปลงผันไปหน้า (Forward Converter)

วงจรแปลงผันไปหน้าเป็นวงจรทอนระดับที่มีหม้อแปลงเพื่อการแยกโคด (isolation) มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.2 หม้อแปลงทำหน้าที่ส่งผ่านพลังงานในช่วงเวลาที่สวิตช์ต่อวงจร และกระแสไหลออกจากแหล่งแรงดันไปสู่โหลด หม้อแปลงจะมีขดลวดเพิ่มขึ้นขนาดหนึ่งขดเรียกว่า ขดลวดตั้งคืน (Reset Coil :  $N'$ ) มีไว้เพื่อ ระบายกระแสทำแม่เหล็ก (Magnetizing Current) ให้ไหลในช่วงที่สวิตช์ตัดวงจร ซึ่งจะทำให้ กระแสทำแม่เหล็กลดลงเป็นศูนย์ ก่อนที่จะเริ่มวัฏจักรใหม่ วงจรนี้นิยมใช้กับวงจรที่มีกำลังออกไม่สูงนัก

วงจรpush-pull ภาคแรงดัน (Push-Pull Converter)

วงจรpush-pull ภาคแรงดันมีโครงสร้างของวงจรดังรูปที่ 2.3 โครงสร้างของวงจรpush-pull ภาคแรงดันประกอบด้วย 2 กึ่งแรงดัน สลับกันเป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้ 1 กึ่งกระแส วงจรใช้งานจริงจะใช้หม้อแปลงที่มีจุดกลางเหมือนเป็นกึ่งแรงดัน 2 กึ่งซึ่งมีสวิตช์ตัดต่อเข้ากับกึ่งกระแส คือตัวเหนี่ยวนำและโหลด วงจรมีลักษณะคล้ายกับวงจรไปหน้า (Forward) ต่างกันที่ วงจรpush-pullมี



รูปที่ 2.3 วงจรพช-พชภาคแรงดัน (Push-Pull Converter)

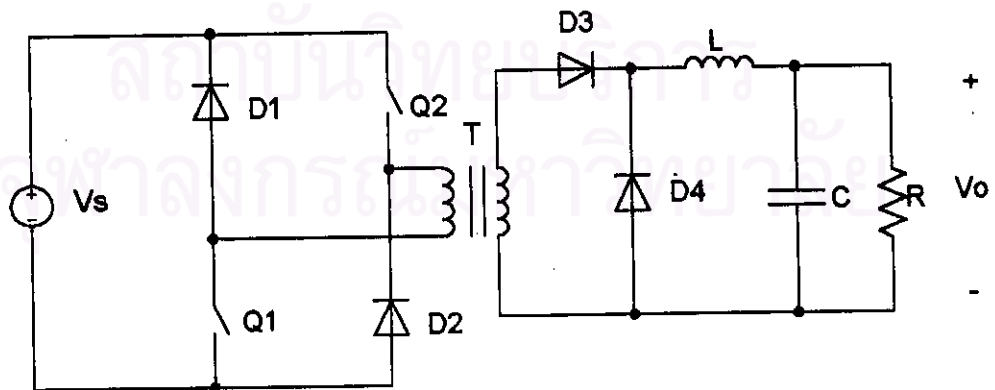
ลักษณะสมมาตร (Symmetrical) อัตราการแปลงผันแรงดันของวงจรพช-พช ภาคแรงดัน ( $V_o/V_s$ ) มีค่าเท่ากับ  $ND$  โดย

$N$  = อัตราส่วนจำนวนรอบของขดทุติยภูมิต่อขดปฐมภูมิ

$D$  = วัฏจักรงานรวม, วัฏจักรงานของสวิตช์แต่ละตัวคือ  $D/2$

วงจรพช-พช ภาคแรงดันสามารถจ่ายกำลังงานได้สูงกว่าวงจรไปหน้า และเหมาะสำหรับกรณี  $V_s$  มีค่าต่ำ เพราะมีแรงดันตกคร่อมสวิตช์เพียงตัวเดียว (เปรียบเทียบกับวงจรบริดจ์ซึ่งมีแรงดันตกคร่อมสวิตช์ 2 ตัว)

#### วงจรบริดจ์อสมมาตร (Asymmetrical Bridge)



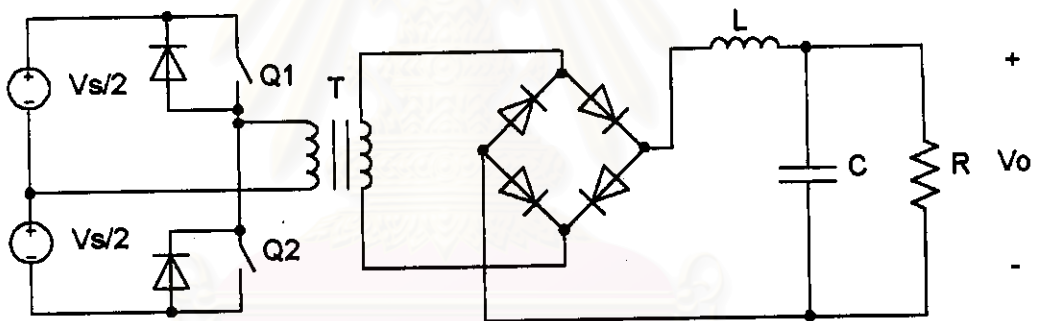
รูปที่ 2.4 วงจรบริดจ์อสมมาตร (Asymmetrical Bridge)

วงจรบริดจ์ออสซิลเลเตอร์มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.4 การทำงานของวงจรบริดจ์ออสซิลเลเตอร์ เหมือนวงจรไปหน้า (Forward) แต่หม้อแปลงมีเพียง 2 ขด (ไม่ต้องมีขดลวดตั้งต้น) เพราะในช่วงเวลาที่สวิตช์หยุดนำกระแส กระแสทำแม่เหล็ก ( $I_m$ ) จะบังคับให้ไดโอดนำกระแส และคืนพลังงานสู่แหล่งแรงดัน  $V_s$  เพื่อให้หม้อแปลงมีดุลย์โวลต์-วินาที (Volt-Sec Balance) วัฏจักรงานของวงจรบริดจ์ออสซิลเลเตอร์จะต้องน้อยกว่า 0.5

ข้อดี ของวงจรบริดจ์ออสซิลเลเตอร์ คือ สวิตช์ได้รับแรงดันเท่ากับ  $V_s$  เท่านั้น , ใช้หม้อแปลงที่มีขดลวดเพียง 2 ขด และไม่มีปัญหาการเกิดแรงดันยอดแหลม (Spike Voltage) ที่สวิตช์ ที่เป็นผลจากความเหนี่ยวนำรั่วไหลของหม้อแปลง เนื่องจาก ไม่มีการโอนย้ายของกระแสทำแม่เหล็กจากขดปฐมภูมิไปยังขดลวดตั้งต้น (Reset Coil)

ข้อเสีย คือต้องใช้สวิตช์ถึง 2 ตัว และวัฏจักรถูกจำกัดเพียง 0.5 ทำให้สวิตช์มีประสิทธิภาพต่ำ

### วงจรกึ่งบริดจ์ (Half-Bridge)



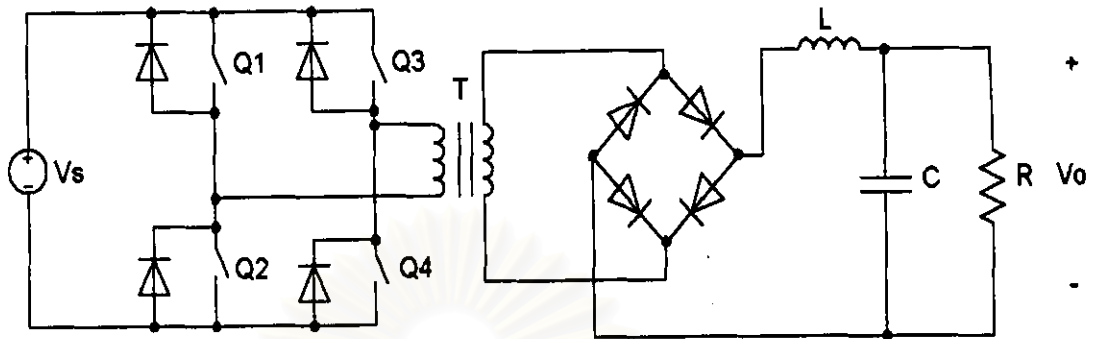
รูปที่ 2.5 วงจรกึ่งบริดจ์ (Half-Bridge)

วงจรกึ่งบริดจ์มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.5 วงจรกึ่งบริดจ์ใช้แหล่งแรงดัน 2 แหล่งป้อนพลังงานให้หม้อแปลง การทำงานคล้ายกับวงจรพุก-พุก แต่แรงดันที่ขดปฐมภูมิมิค่าเพียงครึ่งหนึ่งของแรงดันรวมจากแหล่งจ่ายไฟตรง ( $V_s$ )

ข้อดี คือ มีแรงดันคร่อมสวิตช์สูงสุดเท่ากับ  $V_s$

ข้อเสีย คือ แรงดันที่ขดลวดปฐมภูมิจะเป็นครึ่งหนึ่งของแรงดันรวมของแหล่งจ่ายไฟตรง ( $V_s$ )

## วงจรรบริดจ์ (Bridge)

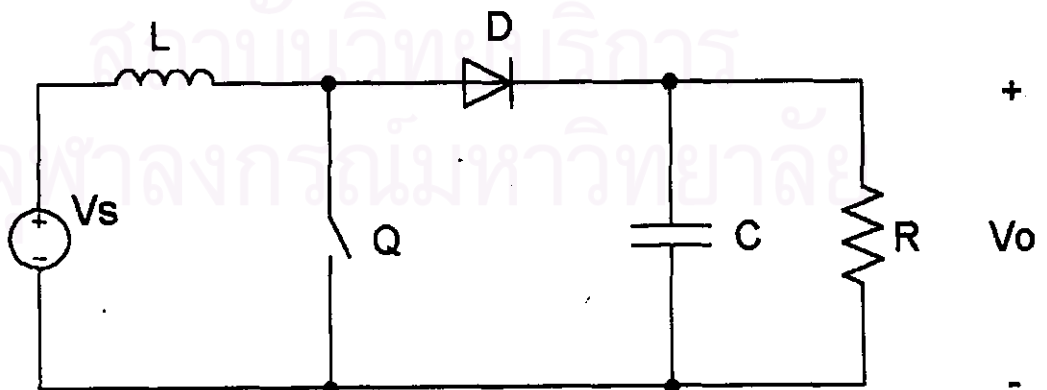


รูปที่ 2.6 วงจรรบริดจ์ (Bridge)

วงจรรบริดจ์มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.6 วงจรรบริดจ์ใช้สวิตช์ 4 ตัวทำงานสลับกันเป็นคู่ โดย Q1 นำกระแสพร้อมกับ Q4, ส่วน Q2 นำกระแสพร้อมกับ Q3 การทำงานคล้ายกับวงจรรบริดจ์ แต่แรงดันที่ขดปฐมภูมิเท่ากับแรงดันแหล่งจ่าย  $V_s$  กระแสที่ไหลจึงต่ำกว่า เมื่อจ่ายกำลังงานเท่ากัน

ข้อดี คือ ได้กำลังด้านออกที่สูงกว่าวงจรรบริดจ์ สำหรับพิกัดกระแสและแรงดันของสวิตช์ที่เท่ากัน  
ข้อเสีย คือ ต้องใช้สวิตช์ถึง 4 ตัวทำให้วงจรมีความซับซ้อนขึ้น

## 2. วงจรทบระดับ (Boost)

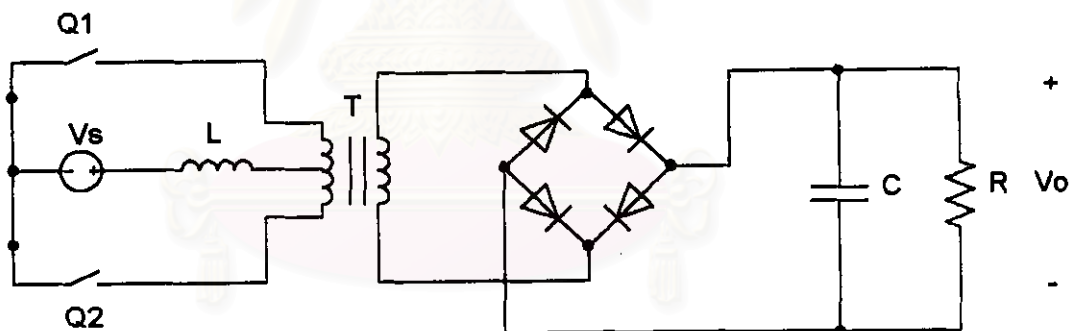


รูปที่ 2.7 วงจรทบระดับ (Boost)

วงจรทบทระดับมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.7 โครงสร้างพื้นฐานของวงจรทบทระดับเหมือนวงจรทอนระดับ คือ มีกึ่งแรงดัน 1 กิ่ง และกิ่งกระแส 1 กิ่ง แต่พลังงานไหลจากกิ่งกระแสที่ประกอบด้วยแหล่งแรงดันไฟตรง  $V_s$  อนุกรมกับ ตัวเหนี่ยวนำ  $L$  ไปสู่กิ่งที่ประกอบด้วยตัวเก็บประจุ  $C$  และความต้านทานของวงจร  $R$  วงจรทบทระดับมีกระแสด้านเข้าที่ต่อเนื่อง เมื่อ  $D$  เป็นวัฏจักรงานของสวิตช์ มีอัตราการแปลงผันแรงดัน  $(V_o/V_s) = 1/(1-D)$   
 ข้อดี คือ ได้แรงดันออกสูง  $V_o = V_s/(1-D)$   
 ข้อเสีย คือ กระแสด้านออกไม่ต่อเนื่อง แรงดันตกคร่อมสวิตช์สูง

### วงจรพุก-พุกภาคกระแส

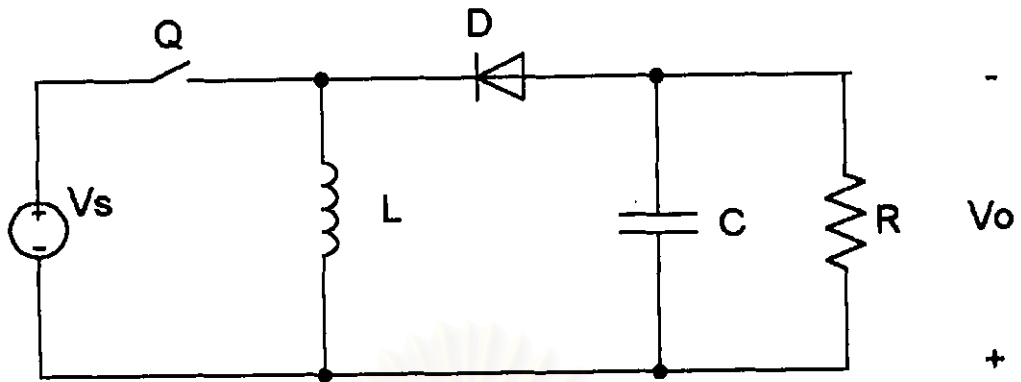
วงจรพุก-พุกภาคกระแสมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.8 วงจรพุก-พุกภาคกระแสประกอบด้วย กิ่งกระแส 2 กิ่ง สลับกันเป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้ 1 กิ่งแรงดัน อาจพิจารณาได้ว่า วงจรพุก-พุกภาคกระแสมีลักษณะเหมือนกับวงจรทบทระดับ 2 ชุด จากหลักการสมดุลของผลคูณแรงดันเวลา ของตัวเหนี่ยวนำ  $L$  สามารถคำนวณอัตราการแปลงผันแรงดันได้  $(V_o/V_s) = N/(1-D)$



รูปที่ 2.8 วงจรพุก-พุกภาคกระแส

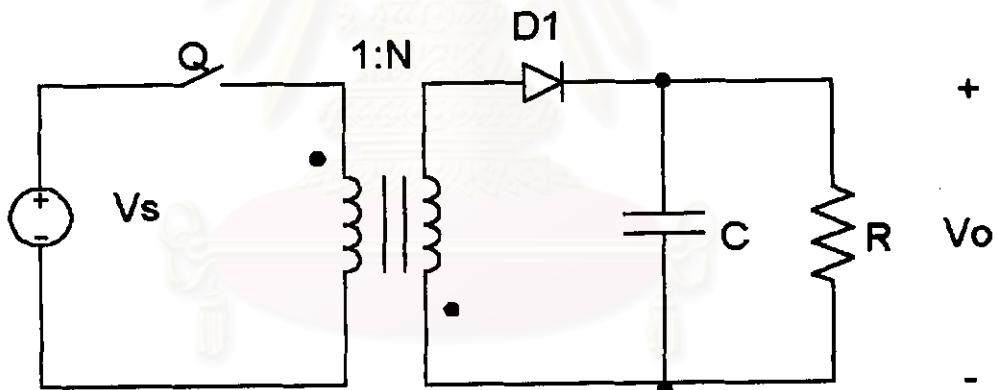
### 2.3 วงจรทอนทบทระดับภาคแรงดัน (Buck-Boost)

วงจรทอนทบทระดับภาคแรงดันมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.9 วงจรทอนทบทระดับภาคแรงดันประกอบด้วยกึ่งแรงดัน 2 กิ่ง และกิ่งกระแส 1 กิ่ง โดยกึ่งแรงดันกิ่งหนึ่ง เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน และอีกกึ่งแรงดันหนึ่งรับพลังงาน จากหลักการสมดุลของผลคูณแรงดันเวลา ของตัวเหนี่ยวนำ  $L$  สามารถคำนวณอัตราการแปลงผันแรงดันได้  $(V_o/V_s) = D/(1-D)$



รูปที่ 2.9 วงจรทอนทบระดับภาคแรงดัน (Buck-Boost)

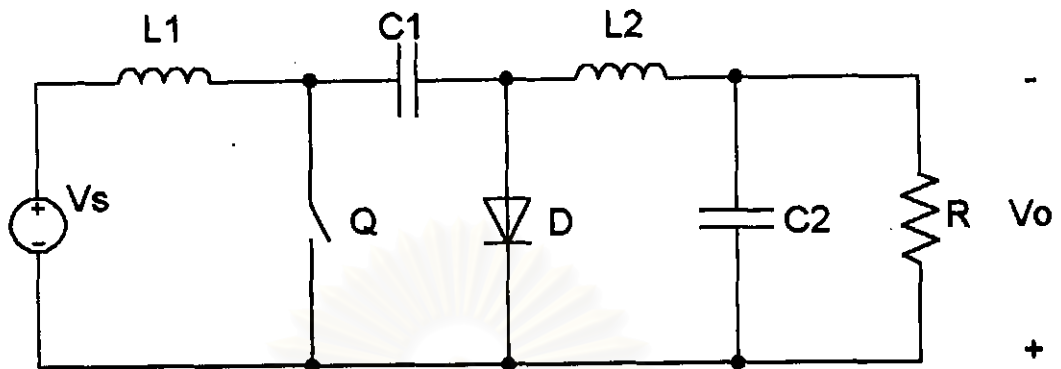
วงจรบินกลับ (Flyback Converter)



รูปที่ 2.10 วงจรบินกลับ (Flyback Converter)

วงจรบินกลับมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.10 วงจรบินกลับก็คือวงจรทอนทบระดับภาคแรงดันที่มีหม้อแปลง มีอัตราการแปลงผันแรงดัน  $V_o/V_s = ND/(1-D)$  โดยใช้ตัวเหนี่ยวนำทำแม่เหล็ก  $L_m$  ของหม้อแปลง ทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำของวงจรทอนทบระดับ

### วงจรทอนทระดับภาคกระแส (Cuk)



รูปที่ 2.11 วงจรทอนทระดับภาคกระแส (Cuk)

วงจรทอนทระดับภาคกระแส มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.11 วงจรทอนทระดับภาคกระแสประกอบด้วย กิ่งกระแส 2 กิ่ง กับกิ่งแรงดัน 1 กิ่ง โดยกิ่งกระแสหนึ่ง เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน และอีกกิ่งกระแสหนึ่งรับพลังงาน อัตราการแปลงผันแรงดัน  $V_o/V_s = D/(1-D)$

### วงจรเรียงกระแสแบบวิธีสวิตช์ (Switch-Mode Rectifier, SMR)

วงจรเรียงกระแสแบบวิธีสวิตช์เป็นการนำเอาวงจรแปลงผันไฟตรงพื้นฐาน เช่นวงจรทอนระดับ วงจรทระดับมาใช้ในการควบคุมกระแสด้านเข้าจากสายกำลังให้เป็นรูปไซน์เพื่อลดกระแสฮาร์มอนิกและเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังของสายกำลัง

วงจรเรียงกระแสแบบวิธีสวิตช์แบบเฟสเดียวที่นิยมมากที่สุดได้แก่วงจรทระดับ นอกจากนั้นก็ยังมียังวงจรที่อนุพัทธ์จากวงจรทระดับ วงจรทอนทระดับ และวงจรที่อนุพัทธ์จากวงจรทอนทระดับ

วงจรเรียงกระแสแบบวิธีสวิตช์ส่วนใหญ่จะมีวงจรเรียงกระแสที่ใช้ไดโอดเรียงกระแสอยู่ทางด้านเข้า งานวิทยานิพนธ์นี้ใช้วงจรเรียงกระแสแบบที่ไม่ต้องที่ใช้วงจรไดโอดเรียงกระแสด้านเข้า (โคทม อาริยา, 2537)

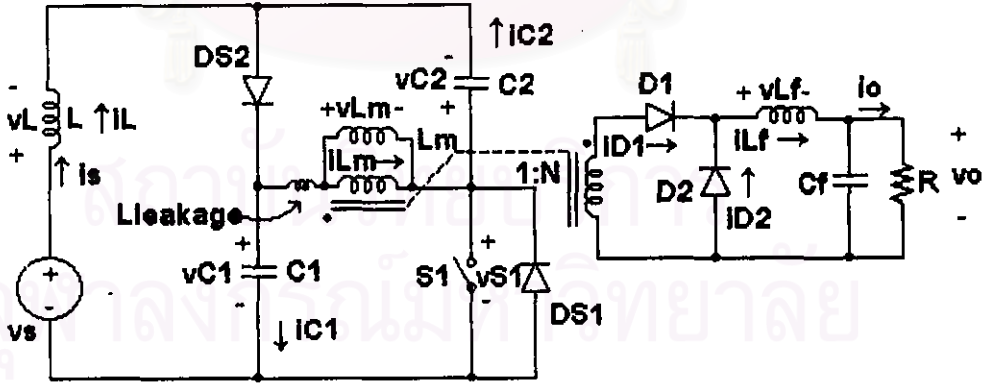


วงจรเรียงกระแสแบบวิธีสวิตซ์ไม่ต้องใช้วงจรโคโอดเรียงกระแสด้านเข้า (โคทอม อารียา.2537)

วงจรเรียงกระแสแบบวิธีสวิตซ์ที่น่าเสนอนี้ เป็นวงจรเรียงกระแสแบบวิธีสวิตซ์ที่ไม่ต้องใช้โคโอดเรียงกระแสด้านเข้า ที่สามารถทำงานได้ทั้งในภาคไฟตรง-ไฟตรง และ ภาคไฟสลับ-ไฟตรง โดยที่การทำงานตามธรรมชาติของวงจรมีลักษณะที่จะไม่ทำให้เกิดแรงดันยอดแหลมเนื่องมาจากความเหนี่ยวนำรั่วไหลของหม้อแปลงที่ใช้ในการแยกโคค (พุทธชัย ศิลปวิจารณ์ และคณะ , 2541)

1. การทำงานในภาคไฟตรง-ไฟตรง

วงจรเรียงกระแสแบบวิธีสวิตซ์ที่สร้างขึ้นนี้มีโครงสร้างพื้นฐานมาจากวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ตามรูปที่ 2.12 จึงจะอธิบายการทำงานของวงจรในภาคไฟตรง-ไฟตรงนี้ก่อนที่จะอธิบายการทำงานในภาคไฟสลับ-ไฟตรงโดยในการอธิบายนี้จะใช้สัญลักษณ์ตามแนวทางของ IEEE ยกเว้นค่าเฉลี่ยเฉพาะที่ (ค่าเฉลี่ยที่กรองความถี่การสวิตซ์ออกแล้ว) จะใช้อักษรตัวเล็กที่มีขีดข้างบน เช่น แรงดันของตัวเหนี่ยวนำ  $L$  ใช้  $v_L$  โดยมีสมมุติฐานว่าอุปกรณ์ทุกตัวเป็นอุปกรณ์อุดมคติ , กระแสด้านออกมีค่าคงตัว , ตัวเก็บประจุ  $C1$  กับ  $C2$  นั้นมีพลังงานเก็บสะสมไว้อยู่ก่อนแล้ว, แรงดัน  $V_{C1}$  และ  $V_{C2}$  มีค่าเป็นบวกทั้งคู่ และมีค่ามากกว่าค่ายอดของ  $V_s$ , ตัวเหนี่ยวนำ  $L$  และ  $L_m$  มีพลังงานสะสมไว้อยู่ก่อนแล้ว



รูปที่ 2.12 วงจรเรียงกระแสแบบวิธีสวิตซ์ในการทำงานภาคไฟตรง-ไฟตรง

การทำงานแบ่งออกเป็นสองช่วงคือ ช่วง D และ D'

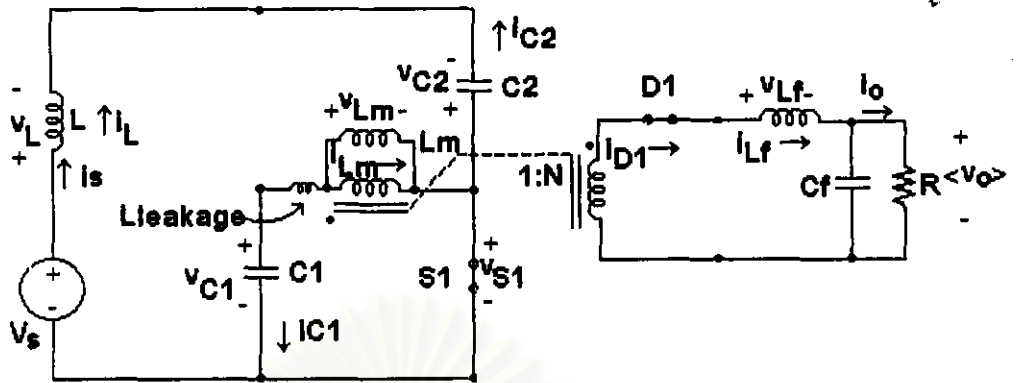
1). ช่วง DT สวิตช์ S1 ต้องวงจรทำให้พลังงานที่เก็บไว้ในตัวเก็บประจุ C1 ถ่ายให้ตัวเหนี่ยวนำ  $L_m$  และโหลดโดยผ่านไดโอด D1 ส่วนพลังงานในตัวเก็บประจุ C2 และ  $V_s$  จะถ่ายให้ตัวเหนี่ยวนำ  $L$  รูปที่ 2.13 แสดงรูปลักษณะของวงจรในช่วง D

ช่วงนี้กระแส  $i_s$  และ  $i_L$  จะเพิ่มขึ้นด้วยความลาดชันเท่ากับ  $\frac{v_s + v_{C2}}{L}$  กระแส  $i_{Lm}$  จะเพิ่มขึ้นด้วยความลาดชันเท่ากับ  $\frac{v_{C1}}{L_m}$  และกระแส  $i_{Lf}$  จะเพิ่มขึ้นด้วยความลาดชันเท่ากับ  $\frac{N \cdot v_{C1} - \langle v_o \rangle}{L_f}$  ส่วนแรงดันของตัวเก็บประจุ C1 และ C2 จะลดลงโดยมีความลาดชันเท่ากับ  $-\frac{(N i_{Lf} + i_{Lm})}{C1}$  และ  $-\frac{i_L}{C2}$  ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.15

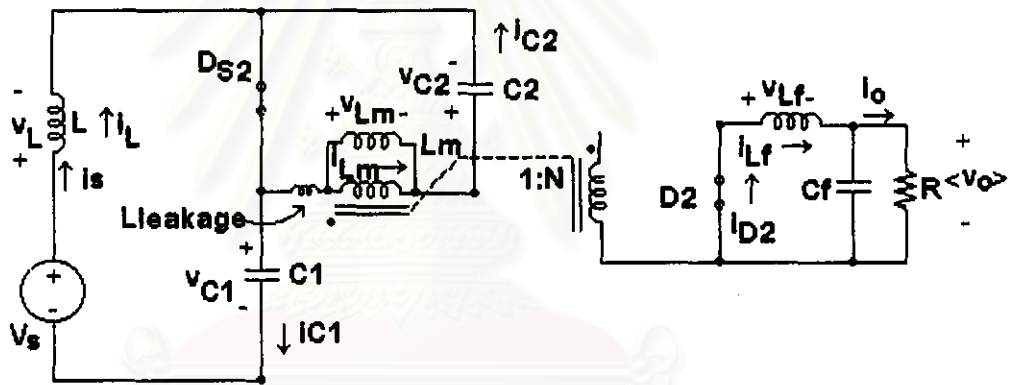
2) ช่วง D'T สวิตช์ S1 ตัดวงจรและ DS2 จะต้องวงจร พลังงานที่สะสมอยู่ในตัวเหนี่ยวนำ  $L_m$  จะถ่ายให้ตัวเก็บประจุ C2 พลังงานในตัวเหนี่ยวนำ  $L$  และ  $V_s$  จะถ่ายให้ตัวเก็บประจุ C1 ไดโอด D1 จะตัดวงจร และกระแสไหลจะบังคับให้ไดโอด D2 ต้องวงจรทำให้เกิดการหมุนเปล้าของกระแสไหล รูปที่ 2.14 แสดงรูปลักษณะของวงจรในช่วง D'

ช่วงนี้กระแส  $i_L$  จะลดลงโดยมีความลาดชันเท่ากับ  $\frac{v_s - v_{C1}}{L}$  ส่วนกระแส  $i_{Lm}$  จะลดลงโดยมีความลาดชันเท่ากับ  $-\frac{v_{C2}}{L_m}$  และกระแส  $i_{Lf}$  จะลดลงโดยมีความลาดชันเท่ากับ  $-\frac{\langle v_o \rangle}{L_f}$  ส่วนแรงดันของตัวเก็บประจุ C1 และ C2 จะเพิ่มขึ้นโดยมีความลาดชันเท่ากับ  $\frac{i_L}{C1}$  และ  $\frac{i_{Lm}}{C2}$  ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.15

จากการทำงานข้างต้นจะเห็นได้ว่าเมื่อสวิตช์ S1 ตัดวงจร กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำรั่วไหล (Leakage) ที่ไหลผ่านสวิตช์จะย้ายไปไหลผ่านตัวเก็บประจุ C2 อย่างต่อเนื่อง จึงไม่ทำให้เกิดแรงดันขอดแหลมคร่อมสวิตช์ ซึ่งนับเป็นข้อดีของวงจรที่ไม่ต้องใช้สวิตช์เบอร์



รูปที่ 2.13 รูปลักษณะของวงจรในช่วง D



รูปที่ 2.14 รูปลักษณะของวงจรในช่วง D'

**สมการของค่าเฉลี่ยเฉพาะที่ของวงจร**

เราสามารถคำนวณหาค่าเฉลี่ยเฉพาะที่ของตัวแปรต่างๆของวงจร โดยใช้สมมติฐานว่าในแต่ละคาบของการสวิตช์ กระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำและแรงดันของตัวเก็บประจุ มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก กล่าวคือในแต่ละคาบของการสวิตช์ ตัวเหนี่ยวนำมีคุณโวลต์-วินาที และตัวเก็บประจุมีคุณแอมแปร์-วินาที

พิจารณาคุณโวลต์-วินาที ที่ ตัวเหนี่ยวนำ  $L_m$  จะได้

$$\overline{v_{C1}} \cdot DT - \overline{v_{C2}} \cdot D'T = 0$$

$$\overline{v_{C1}} = \frac{\overline{v_{C2}} \cdot D'}{D} \quad 2.1$$

พิจารณาจุดโวลต์-วินาที ที่ ตัวเหนี่ยวนำ L จะได้

$$(v_s + \overline{v_{C2}})DT + (v_s - \overline{v_{C1}})D'T = 0$$

แทนค่า  $\overline{v_{C1}}$  จากสมการ 2.1 ได้

$$\overline{v_{C2}} = \frac{v_s \cdot D}{(1 - 2D)} \quad 2.2$$

แทนค่า  $\overline{v_{C2}}$  ลงในสมการ 2.1 ได้

$$\overline{v_{C1}} = \frac{v_s \cdot D'}{(1 - 2D)} \quad 2.3$$

พิจารณาจุดโวลต์-วินาที ที่ ตัวเหนี่ยวนำ  $L_r$  จะได้

$$(N \cdot \overline{v_{C1}} - \langle v_o \rangle)DT - \langle v_o \rangle D'T = 0$$

$$\langle v_o \rangle = N \cdot D \cdot \overline{v_{C1}}$$

$$\langle v_o \rangle = \frac{N \cdot D \cdot v_s \cdot D'}{(1 - 2D)}$$

$$M = \frac{\langle v_o \rangle}{v_s} = \frac{N \cdot D \cdot D'}{(1 - 2D)} \quad 2.4$$

พิจารณาจุดแอมแปร์-วินาที ที่ ตัวเก็บประจุ C2 จะได้

$$-i_{Lr} \cdot DT + i_{Lm} \cdot D'T = 0$$

$$\overline{i_{Lm}} = \frac{i_{Lr} \cdot D}{D'}$$

2.5

พิจารณาจุดแอมแปร์-วินาที ที่ ตัวเก็บประจุ C1 จะได้

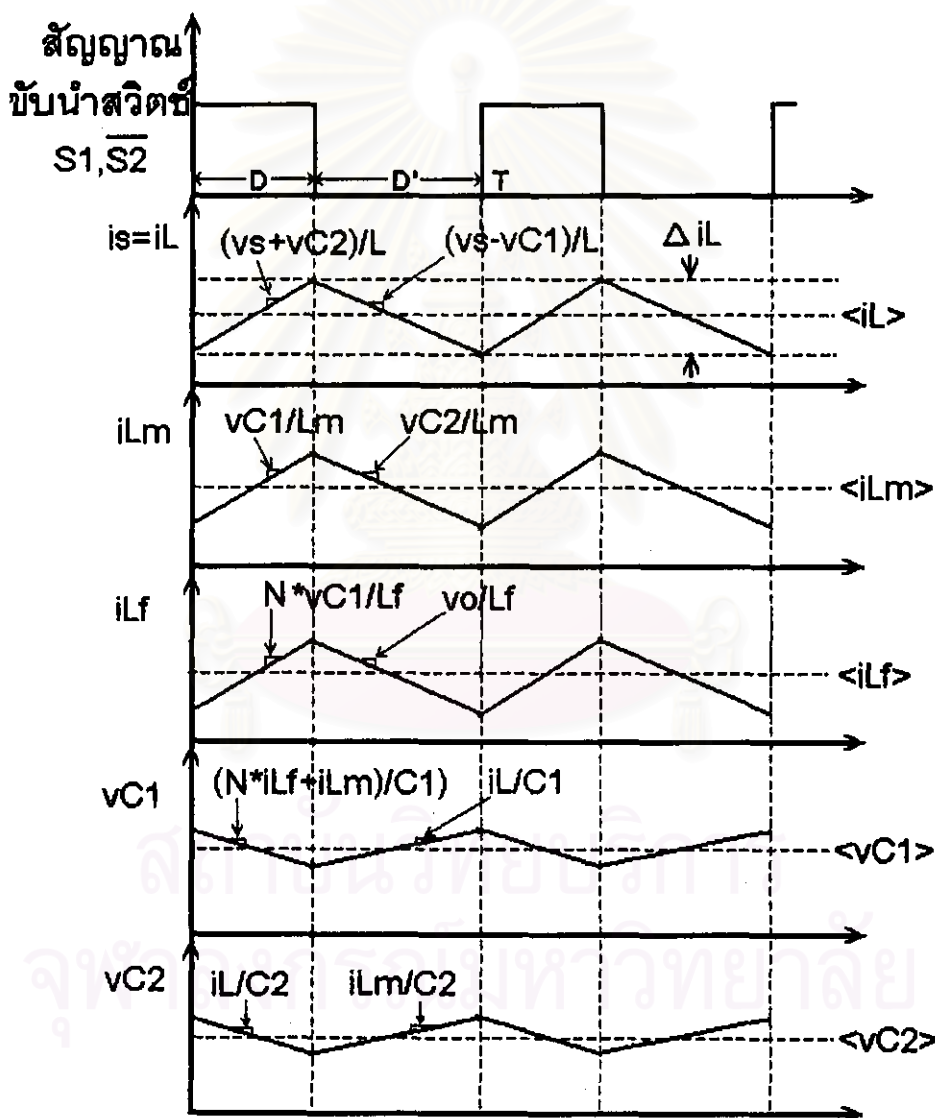
$$-(N\bar{i}_{lf} + \bar{i}_{lm})DT + \bar{i}_l \cdot D'T = 0$$

แทนค่า  $\bar{i}_{lm}$  จาก สมการที่ 2.5 และ แทนค่า  $\bar{i}_{lf}$  ด้วย  $\langle i_o \rangle$  จะได้

$$-N \langle i_o \rangle \cdot D - \frac{\bar{i}_l \cdot D^2}{D'} + \bar{i}_l \cdot D' = 0$$

$$\bar{i}_l = \frac{N \cdot D \cdot D' \cdot \langle i_o \rangle}{(1 - 2D)}$$

2.6



รูปที่ 2.15 รูปคลื่นต่างๆของวงจรเรียงกระแสแบบวิธีสวิตช์ในการทำงานภาคไฟตรง-ไฟตรง

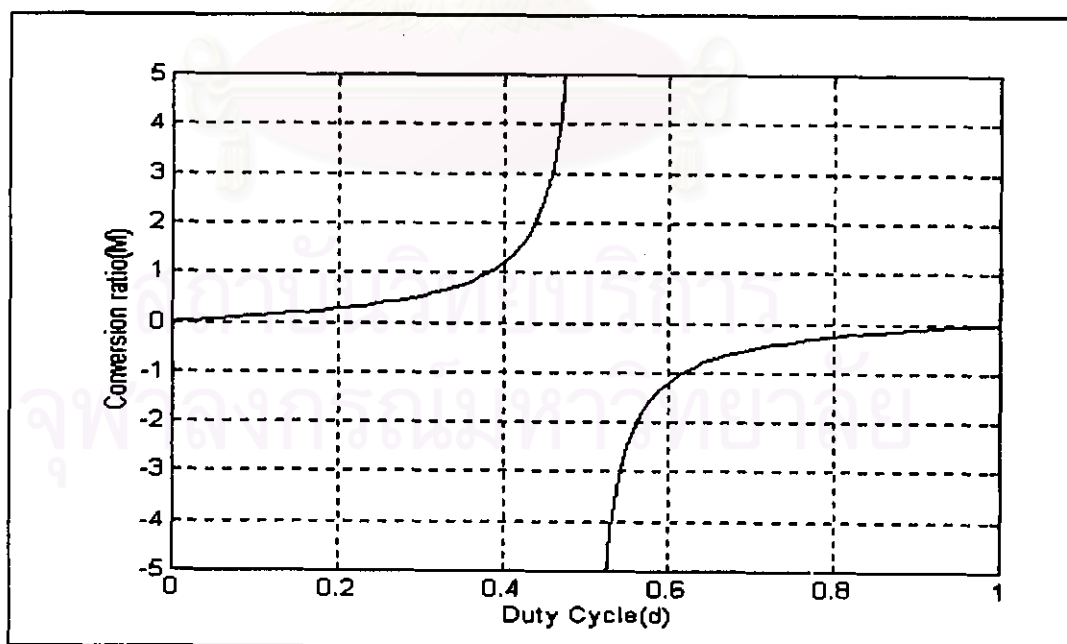
$$\text{จากสมการที่ 2.5 จะได้ } \overline{i_{L,m}} = \frac{\overline{i_L} \cdot D}{D'} = \frac{N \cdot D^2 \cdot \langle i_o \rangle}{(1-2D)} \quad 2.7$$

และแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ในขณะหยุดนำกระแสและไดโอด DS2 นำกระแส เท่ากับ

$$\overline{v_{s1}} = \overline{v_{c1}} + \overline{v_{c2}} = \frac{v_s}{(1-2D)} \quad 2.8$$

จากสมการต่างๆข้างต้น จะพบว่าวงจรนี้ไม่เหมาะที่จะทำงานที่ วัฏจักรงาน (D) ใกล้เคียง 0.5 เพราะจะทำให้ ค่าต่างๆมีค่าสูงมาก(เข้าสู่อนันต์ในทางทฤษฎี)

สมการที่ 2.4 แสดงให้เห็นว่าอัตราการแปลงผัน (M) ของวงจรเป็นได้ทั้งบวกและลบ ขึ้นอยู่กับค่าวัฏจักรงาน (D) โดยที่แรงดันด้านออกจะเป็นบวกเสมอ ดังนั้นแรงดันด้านเข้าเป็นได้ทั้งบวกและลบ โดยการแปรค่าวัฏจักรงานให้น้อยกว่า 0.5 (M เป็นบวก) และ การแปรค่าวัฏจักรงานให้มากกว่า 0.5 (M เป็นลบ) ตามลำดับ รูปที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแปลงผัน (M) และค่าวัฏจักรงาน (D) ดังนั้นจึงนำไปทำเป็นวงจรเรียงกระแสแบบวิธีสวิตช์เพื่อเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับที่แรงดันด้านเข้าเป็นได้ทั้งบวกและลบให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงได้ โดยไม่ต้องใช้ไดโอดเรียงกระแสด้านเข้า



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแปลงผัน (M) และค่าวัฏจักรงาน (D)

การที่มีแรงดันเข้าเป็นทั้งบวกและลบ จะทำให้การทำงานของวงจรในช่วงที่แรงดันเข้าเป็นลบต่างไปจากช่วงที่มีแรงดันเข้าเป็นบวกดังแสดงในรูปที่ 2.17

- ช่วงแรงดันเข้าเป็นบวก

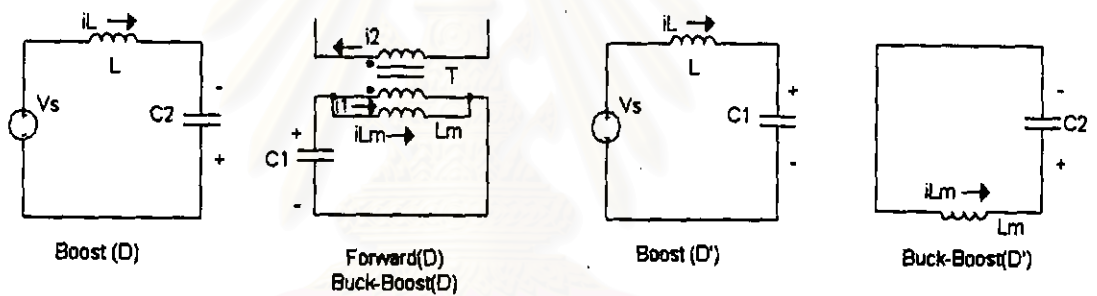
1. ช่วง D  $V_s, C_2, L$  จะต่อวงจรในลักษณะวงจรทระดับช่วง D ส่วน  $C_1$  กับ  $L_m$  ต่อวงจรในลักษณะวงจรไปหน้าช่วง D และวงจรทอนทระดับช่วง D

2. ช่วง  $D'$   $C_1, V_s, L$  จะต่อวงจรในลักษณะวงจรทระดับช่วง  $D'$  ส่วน  $C_2$  กับ  $L_m$  ต่อวงจรในลักษณะวงจรทอนทระดับช่วง  $D'$

- ช่วงแรงดันเข้าเป็นลบ

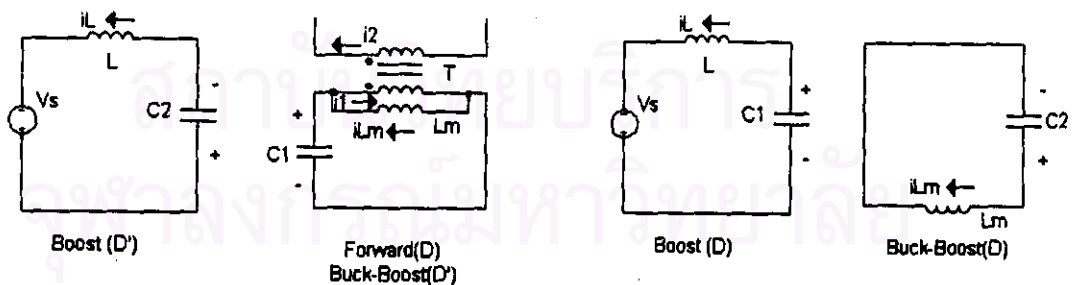
1. ช่วง D  $V_s, C_2, L$  จะต่อวงจรในลักษณะวงจรทระดับช่วง  $D'$  ส่วน  $C_1$  กับ  $L_m$  ต่อวงจรในลักษณะวงจรไปหน้าช่วง D และวงจรทอนทระดับช่วง  $D'$

2. ช่วง  $D'$   $C_1, V_s, L$  จะต่อวงจรในลักษณะวงจรทระดับช่วง D ส่วน  $C_2$  กับ  $L_m$  ต่อวงจรในลักษณะวงจรทอน-ทระดับช่วง D



(ก) แรงดันเข้าเป็นบวก ช่วง D

(ข) แรงดันเข้าเป็นบวก ช่วง  $D'$

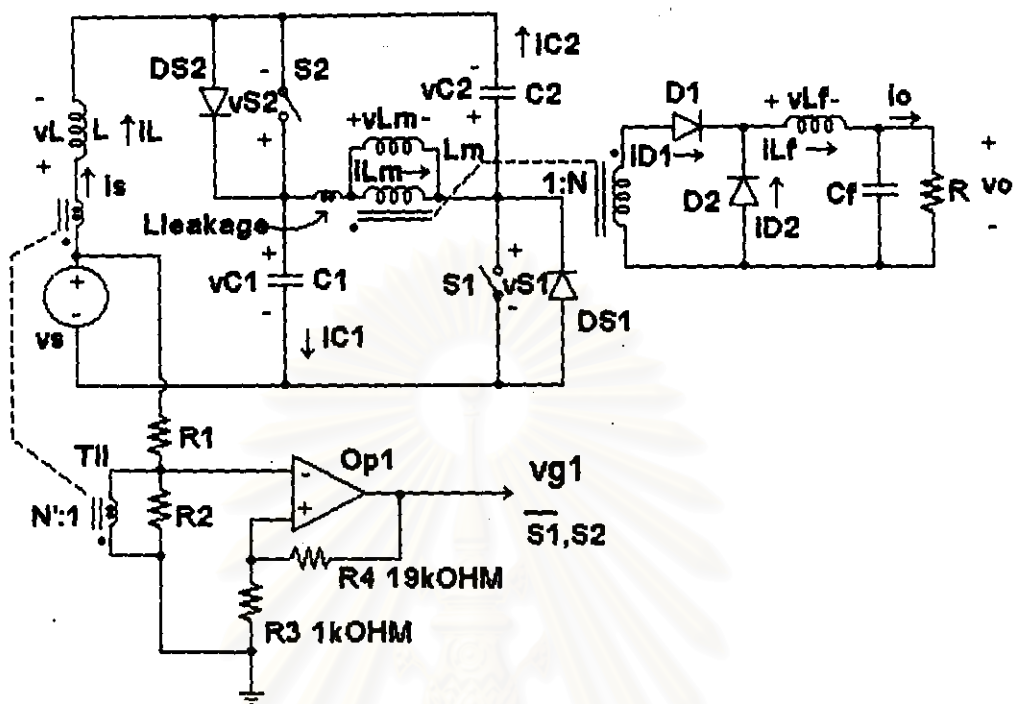


(ค) แรงดันเข้าเป็นลบ ช่วง D

(จ) แรงดันเข้าเป็นลบ ช่วง  $D'$

รูปที่ 2.17 รูปลักษณะของวงจรเมื่อแรงดันด้านเข้าเป็นทั้งบวกและลบ

## 2 การทำงานในภาคไฟสลับ-ไฟตรง



รูปที่ 2.18 วงจรเรียงกระแสแบบวิธีสวิตซ์ในการทำงานภาคไฟสลับ-ไฟตรง และวงจรควบคุม

จากวงจรที่ 2.12 และสมการที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าอัตราการแปลงผันอาจมีค่าได้ทั้งบวกและลบ โดย  $M$  มีค่าเป็นบวกเมื่อ  $D < 0.5$  และเป็นลบ เมื่อ  $D > 0.5$  ทำให้วงจรทำงานได้ทั้งกรณีที่มีค่าเป็นบวกและเป็นลบ โดยในช่วงแรงดันเข้าเป็นบวก  $D$  ต้องน้อยกว่า 0.5 เพื่อให้แรงดันด้านออกเป็นค่าบวก ( $M$  เป็นค่าบวก) และในช่วงที่แรงดันด้านเข้าเป็นลบ  $D$  ต้องมากกว่า 0.5 เพื่อให้แรงดันด้านออกเป็นค่าบวก ( $M$  เป็นค่าลบ) จากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้สามารถดัดแปลงวงจรในรูปที่ 2.13 ให้เป็นวงจรแปลงผันไฟสลับ-ไฟตรงได้ อย่างไรก็ตามกรณีที่ทำงานเป็นวงจรแปลงผันไฟสลับ-ไฟตรง จะมีการกลับทิศของกระแส  $i_s$  และ  $i_{Lm}$  ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้สวิตซ์นำกระแสได้สองทางแทนไดโอด DS2 จะเห็นได้ว่าวงจรที่นำเสนอนี้จะทำงานได้ไม่ว่ากระแสหรือแรงดันด้านเข้าจะเป็นบวกหรือเป็นลบก็ตาม ทำให้สามารถใช้เป็นวงจรแปลงผันไฟสลับ-ไฟตรง โดยไม่จำเป็นต้องใช้วงจรไดโอดเรียงกระแสเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงก่อนเหมือนกับกรณีที่ใช้วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงที่มีอัตราการแปลงผันเป็นบวกอย่างเดียวและนำกระแสได้



ทางเดียว และเพื่อให้วงจรทำงานได้อย่างเหมาะสม ทั้งในกรณีที่กระแส  $i_s$  และ  $i_{Lm}$  เป็นบวกและลบ จึงขยับนำให้สวิทช์ S1 และ S2 ทำงานแบบคู่ประกอบตลอดเวลา ดังแสดงในรูปที่ 2.18

แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากวงจรกรองด้านออกเป็นแบบครึ่งคลื่น หรือเหมือนกับวงจรไปหน้า ทำให้การจ่ายพลังงานสู่โหลดเกิดขึ้นในช่วงที่สวิทช์ S1 ต่อวงจรเท่านั้น เป็นการทำงานที่ไม่สมมาตร การทำงานของวงจรในช่วงที่แรงดันด้านเข้าเป็นบวกจะเหมือนกับวงจรไปหน้า, วงจรทบทระดับ และวงจรทอนทบทระดับ และในช่วงที่แรงดันด้านเข้ามีค่าเป็นลบจะเหมือนกับวงจรทอนทบทระดับ, วงจรทบทระดับ และวงจรไปหน้า ลักษณะการทำงานของวงจรในช่วงที่แรงดันเข้าเป็นบวก และเป็นลบจะเป็นดังนี้

### ช่วงแรงดันเข้าเป็นบวก

1) ช่วง DT สวิทช์ S1 ต่อวงจรและ S2 ตัดวงจร กระแส  $i_L$  และ  $i_{Lm}$  มีค่าเป็นบวก และมีขนาดเพิ่มขึ้น พลังงานที่อยู่ในตัวเก็บประจุ C1 จะถูกจ่ายให้ตัวเหนี่ยวนำ  $L_m$  และ โหลด โดยผ่านไดโอด D1 ตัวเก็บประจุ C2 และแหล่งจ่ายแรงดันด้านเข้า  $V_s$  จะจ่ายพลังงานให้ตัวเหนี่ยวนำ L กระแสของตัวเหนี่ยวนำ L และ  $L_m$  จะเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้นจนกระทั่ง กระแส  $i_L$  มีค่าเท่ากับค่าขอบเขตบนของแถบฮิสเตอรีซิส วงจรควบคุมจะควบคุมให้สวิทช์ S1 ตัดวงจร สวิทช์ S2 ต่อวงจร จึงจะสิ้นสุดช่วง DT

ช่วงนี้กระแส  $i_s$  และ  $i_L$  จะเพิ่มขึ้นด้วยความลาดชันเท่ากับ  $\frac{v_s + v_{C2}}{L}$  กระแส  $i_{Lm}$  จะเพิ่มขึ้นด้วยความลาดชันเท่ากับ  $\frac{v_{C1}}{L_m}$  และกระแส  $i_{Lf}$  จะเพิ่มขึ้นด้วยความลาดชันเท่ากับ  $\frac{N \cdot v_{C1} - \langle v_o \rangle}{L_f}$  ส่วนแรงดันของตัวเก็บประจุ C1 และ C2 จะลดลงโดยมีความลาดชันเท่ากับ  $-\frac{(N \cdot i_{Lf} + i_{Lm})}{C1}$  และ  $-\frac{i_L}{C2}$  ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.18

2) ช่วง D'T สวิทช์ S1 ตัดวงจร และ S2 ต่อวงจร กระแส  $i_L$  และ  $i_{Lm}$  จะยังคงมีค่าเป็นบวก แต่จะมีขนาดลดลง พลังงานที่อยู่ในตัวเหนี่ยวนำ L และ  $V_s$  จะจ่ายให้ตัวเก็บประจุ C1 และพลังงานจากตัวเหนี่ยวนำ  $L_m$  จะจ่ายให้ตัวเก็บประจุ C2 ไดโอด D1 จะหยุดนำกระแส ไดโอด D2 จะต่อวงจรเพื่อเป็นทางผ่านให้กับกระแสโหลดไหลหมุนเปล่า กระแสของตัวเหนี่ยวนำ L และ  $L_m$  จะลดลงอย่างเชิงเส้นจนกระทั่งกระแส  $i_L$  มีค่าเท่ากับค่าขอบเขตล่างของแถบฮิสเตอรีซิส วงจรควบคุมจะควบคุมให้สวิทช์ S2 ตัดวงจร สวิทช์ S1 ต่อวงจร จึงจะสิ้นสุดช่วง D'T

ช่วงนี้กระแส  $i_L$  จะลดลงโดยมีความลาดชันเท่ากับ  $\frac{v_s - \overline{v_{C1}}}{L}$  ส่วนกระแส  $i_{Lm}$  จะลดลงโดยมีความลาดชันเท่ากับ  $-\frac{\overline{v_{C2}}}{L_m}$  และกระแส  $i_{Lf}$  จะลดลงโดยมีความลาดชันเท่ากับ  $-\frac{\overline{v_o}}{L_f}$  ส่วนแรงดันของตัวเก็บประจุ C1 และ C2 จะเพิ่มขึ้นโดยมีความลาดชันเท่ากับ  $\frac{\overline{i_L}}{C1}$  และ  $\frac{\overline{i_{Lm}}}{C2}$  ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.18

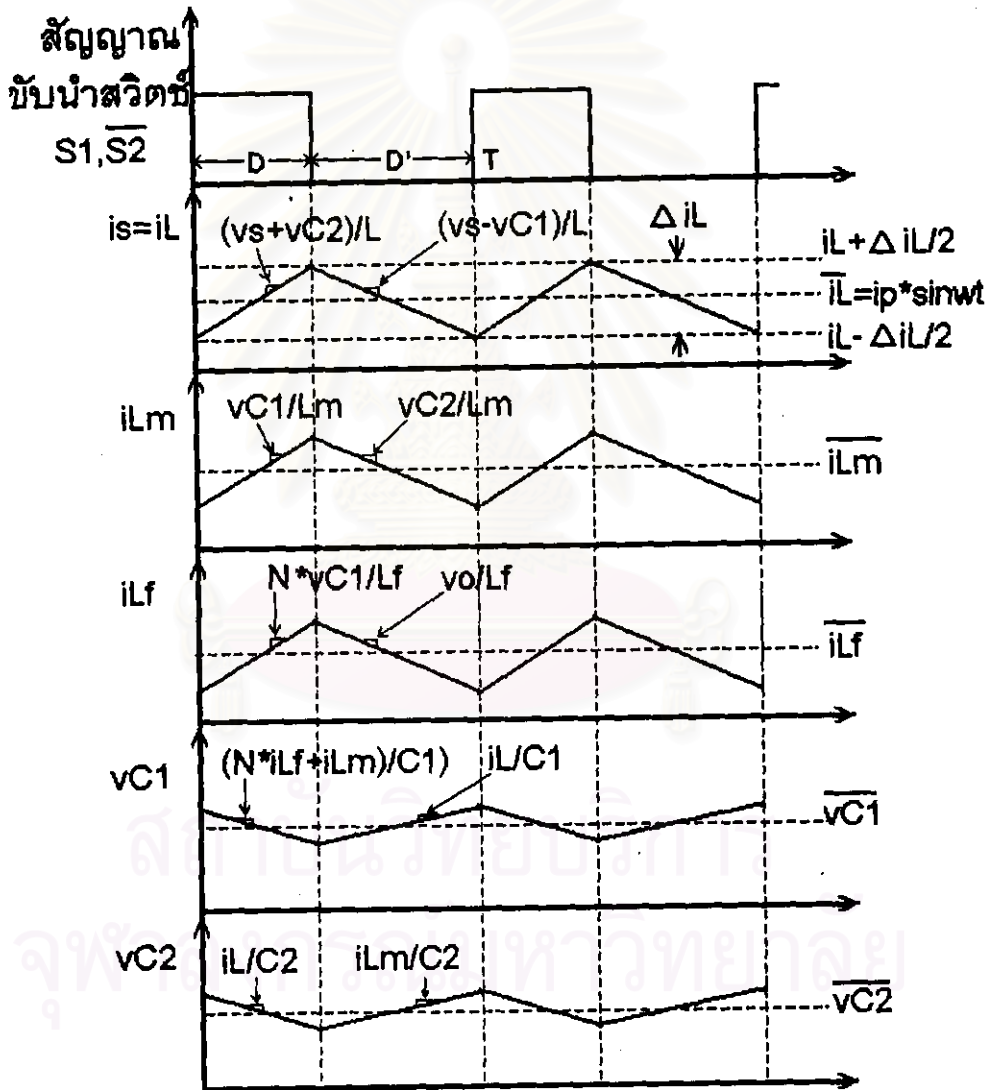
**ช่วงแรงดันเข้าเป็นลบ**

1) ช่วง DT เมื่อสวิตช์ S1 ต่อดวงจร และ S2 ตัดวงจร กระแส  $i_L$  และ  $i_{Lm}$  มีค่าเป็นลบ พลังงานที่  $L_m$  จะถูกจ่ายให้ C1 และ จ่ายไปยังโหลดโดยผ่านไดโอด D1 ส่วนพลังงานที่ L จะจ่ายให้ตัวเก็บประจุ C2 กระแสของตัวเหนี่ยวนำ L และ  $L_m$  จะเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้นจนกระทั่ง กระแส  $i_L$  มีค่าเท่ากับค่าขอบเขตบนของแถบฮิสเตอรีซิส วงจรควบคุมจะควบคุมให้สวิตช์ S1 ต่อดวงจร สวิตช์ S2 ต่อดวงจร จึงจะสิ้นสุดช่วง DT

ช่วงนี้กระแส  $i_s$  และ  $i_L$  จะเพิ่มขึ้นด้วยความลาดชันเท่ากับ  $\frac{v_s + \overline{v_{C2}}}{L}$  กระแส  $i_{Lm}$  จะเพิ่มขึ้นด้วยความลาดชันเท่ากับ  $\frac{\overline{v_{C1}}}{L_m}$  และกระแส  $i_{Lf}$  จะเพิ่มขึ้นด้วยความลาดชันเท่ากับ  $\frac{N \cdot \overline{v_{C1}} - \overline{v_o}}{L_f}$  ส่วนแรงดันของตัวเก็บประจุ C1 และ C2 จะลดลงโดยมีความลาดชันเท่ากับ  $-\frac{(N \cdot \overline{i_{Lf}} + \overline{i_{Lm}})}{C1}$  และ  $-\frac{\overline{i_L}}{C2}$  ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.18

2) ช่วง D'T เมื่อสวิตช์ S1 ต่อดวงจร และ S2 ต่อดวงจร กระแส  $i_L$  และ  $i_{Lm}$  จะยังคงมีค่าเป็นลบแต่จะมีขนาดเพิ่มขึ้น พลังงานที่ตัวเก็บประจุ C2 จะจ่ายให้ตัวเหนี่ยวนำ  $L_m$  พลังงานที่ตัวเก็บประจุ C1 และแหล่งจ่ายแรงดันด้านเข้า  $V_s$  จะจ่ายให้ตัวเหนี่ยวนำ L ไดโอด D1 จะหยุดนำกระแส ไดโอด D2 จะต่อดวงจรเพื่อเป็นทางผ่านให้กับกระแสไหลกลับของตัวเหนี่ยวนำ L และ  $L_m$  จะลดลงอย่างเชิงเส้นจนกระทั่งกระแส  $i_L$  มีค่าเท่ากับค่าขอบเขตล่างของแถบฮิสเตอรีซิส วงจรควบคุมจะควบคุมให้สวิตช์ S2 ต่อดวงจร สวิตช์ S1 ต่อดวงจร จึงจะสิ้นสุดช่วง D'T

ช่วงนี้กระแส  $i_L$  จะลดลงโดยมีความลาดชันเท่ากับ  $\frac{v_s - v_{C1}}{L}$  ส่วนกระแส  $i_{Lm}$  จะลดลงโดยมีความลาดชันเท่ากับ  $-\frac{v_{C2}}{L_m}$  และกระแส  $i_{Lf}$  จะลดลงโดยมีความลาดชันเท่ากับ  $-\frac{v_o}{L_f}$  ส่วนแรงดันของตัวเก็บประจุ  $C1$  และ  $C2$  จะเพิ่มขึ้นโดยมีความลาดชันเท่ากับ  $\frac{i_L}{C1}$  และ  $\frac{i_{Lm}}{C2}$  ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.19 รูปคลื่นของวงจรเรียงกระแสแบบวิธีสวิตช์ในการทำงานภาคไฟสลับ-ไฟตรง

### สมการค่าเฉลี่ยเฉพาะที่ของวงจร

จากการวิเคราะห์การทำงานของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงโดยใช้ชุดแอมแปร์-วินาที ที่ตัวเก็บประจุ และชุดโวลต์-วินาทีที่ตัวเหนี่ยวนำได้สมการของค่าเฉลี่ยของตัวแปรสถานะต่างๆของวงจร ในกรณีที่แรงดันด้านเข้ามีค่าไม่คงที่ แต่มีการเปลี่ยนแปลงกับเวลาเป็นฟังก์ชันไซน์ที่ความถี่ของสายกำลัง และจะมีการควบคุมกระแสด้านเข้าให้มีการเปลี่ยนแปลงกับเวลาเป็นฟังก์ชันไซน์เช่นเดียวกับแรงดันด้านเข้า การวิเคราะห์ห้วงจรจะใช้สมการสถานะ (State Equation) ในรูปของตัวแปรสถานะที่เป็นค่าเฉลี่ยเฉพาะที่ในขณะนั้น ซึ่งถือว่าการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ และจะแทนค่าเฉลี่ยเฉพาะที่ด้วยสัญลักษณ์ที่มีขีดด้านบน ( $\bar{X}$ ) โดยที่ค่าเฉลี่ยของตัวแปรใดๆ ( $\bar{X}$ ) ก็คือค่าเฉลี่ยของตัวแปรนั้น ณ เวลาใดๆ หลังจากที่ได้ละเลยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากการทำงานของสวิตช์แล้ว ส่วนการคำนวณการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยเฉพาะที่ จะใช้การเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากรูปลักษณะที่แตกต่างกันของวงจรในหนึ่งวงรอบของการทำงานของสวิตช์ โดยใช้วิธีการงานของแต่ละรูปลักษณะเป็นน้ำหนักในการเฉลี่ย (R.D. Middlebrook and Slobodan Cuk, 1983)

การเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยเฉพาะที่ของแรงดันตัวเก็บประจุ C1 ในหนึ่งรอบการทำงานของสวิตช์ (D, D') มีค่าตามสมการ

$$C1 \frac{d\bar{v}_{C1}}{dt} = \bar{i}_{C1} = -(N\bar{i}_{Lj} + \bar{i}_{Lm})\bar{D} + \bar{i}_L \cdot \bar{D}' \quad 2.9$$

การเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยเฉพาะที่ของแรงดันตัวเก็บประจุ C2 ในหนึ่งรอบการทำงานของสวิตช์ (D, D') มีค่าตามสมการ

$$C2 \frac{d\bar{v}_{C2}}{dt} = \bar{i}_{C2} = -\bar{i}_L \cdot \bar{D} + \bar{i}_{Lm} \cdot \bar{D}' \quad 2.10$$

การเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยเฉพาะที่ของกระแสตัวเหนี่ยวนำ L ในหนึ่งรอบการทำงานของสวิตช์ (D, D') มีค่าตามสมการ

$$L \frac{d\bar{i}_L}{dt} = \bar{v}_L = (\bar{v}_s + \bar{v}_{C2})\bar{D} + (\bar{v}_s - \bar{v}_{C1})\bar{D}' \quad 2.11$$

การเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยเฉพาะที่ของกระแสตัวเหนี่ยวนำ Lm ในหนึ่งรอบการทำงานของสวิตช์ (D, D') มีค่าตามสมการ

$$Lm \frac{d\overline{i_{Lm}}}{dt} = \overline{v_{Lm}} = \overline{v_{C1}} \cdot D - \overline{v_{C2}} \cdot D' \quad 2.12$$

การเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยเฉพาะที่ของกระแสตัวเหนี่ยวนำ  $L_f$  ในหนึ่งรอบการทำงาน ของสวิตช์ ( $D, D'$ ) มีค่าตามสมการ

$$L_f \frac{d\overline{i_{Lf}}}{dt} = \overline{v_{Lf}} = N \cdot D \cdot \overline{v_{C1}} - \langle v_o \rangle \quad 2.13$$

สมการเหล่านี้สามารถนำไปสร้างแบบจำลองของวงจร สำหรับค่าเฉลี่ยเฉพาะที่ของตัวแปร สถานะ (แบบจำลองที่กรองความถี่การสวิตช์ออกแล้ว) โดยการใช้โปรแกรม MATLAB with SIMULINK

จากสมการที่ 2.13 หากเราทำการเฉลี่ยทั้งคาบสายกำลัง เราจะได้

$$0 = N \cdot \langle D \rangle \cdot \langle v_{C1} \rangle - \langle v_o \rangle$$

ได้  $\langle v_o \rangle = N \cdot \langle D \rangle \cdot \langle v_{C1} \rangle \quad 2.14$

จะเห็นได้ว่า  $\frac{\langle v_o \rangle}{v_{C1}} =$  อัตราการแปลงผันของวงจรแบบไปหน้าโดยถือว่า  $v_{C1}$  เป็น แหล่งจ่ายแรงดัน

และเช่นเดียวกัน เรานำเอาสมการที่ 2.9 และสมการ 2.10 มาลบกันและทำการเฉลี่ยทั้งคาบ สายกำลัง และแทนค่าเฉลี่ยของ  $\overline{i_{Lf}}$  ด้วย  $\langle i_o \rangle$  เมื่อ  $\langle i_L \rangle = 0$  เราจะได้

$$\begin{aligned} \overline{i_{C1}} - \overline{i_{C2}} &= -N \cdot \overline{i_{Lf}} \cdot D - \overline{i_{Lm}} \cdot D + \overline{i_L} \cdot D' + \overline{i_L} \cdot D - \overline{i_{Lm}} \cdot D' \\ 0 &= -N \cdot \langle i_o \rangle \cdot \langle D \rangle - \langle i_{Lm} \rangle + 0 \\ \langle i_{Lm} \rangle &= -N \cdot \langle i_o \rangle \cdot \langle D \rangle \end{aligned} \quad 2.15$$

จะเห็นได้ว่าองค์ประกอบไฟตรงในตัวเหนี่ยวนำจะเพิ่มตามกระแสออก โดยมีทิศทางตรงกันข้าม

พิจารณากระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ตัวที่หนึ่ง จะได้

$$i_{S1} = (N \cdot i_{Lf} + i_{Lm} + i_L) D \quad 2.16$$

ดังนั้นกระแสค่าสูงสุดที่ไหลผ่านสวิตช์ตัวที่หนึ่งมีค่าเท่ากับ

$$i_{S1Peak} = (N \cdot i_{L1Peak} + i_{LmPeak} + i_{LPeak}) \quad 2.17$$

ซึ่งค่ากระแสค่าสูงสุดที่ไหลผ่านสวิตช์ตัวที่หนึ่งจะมีค่าเท่ากับค่ากระแสค่าสูงสุดที่ไหลผ่านสวิตช์ S2 แต่กระแส  $i_{LmPeak}$  จะไม่เท่ากันทั้งช่วงแรงดันเข้าเป็นบวกและลบ

หากพิจารณาที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งขณะหยุดนำกระแสจะพบว่าแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์นั้นมีค่าเท่ากับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ C1 บวกกับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ C2

$$\overline{v_{S1}} = \overline{v_{S2}} = \overline{v_{C1}} + \overline{v_{C2}} \quad 2.18$$

### การควบคุมกระแสด้านเข้า

การควบคุมกระแสด้านเข้าให้เป็นรูปไซน์นั้น จะใช้วิธีที่เรียกว่าการควบคุมแบบฮิสเตอร์ซิสหรือ Current Bang-Bang การควบคุมกระแสแบบฮิสเตอร์ซิสมีอยู่สองวิธีคือ แบบแถบฮิสเตอร์ซิสไม่คงตัว และแบบแถบฮิสเตอร์ซิสคงตัว แบบแถบฮิสเตอร์ซิสไม่คงตัวนั้นจะใช้ในวงจรเรียงกระแสแบบวิธีสวิตช์ ที่ใช้วงจรแปลงผันแบบกระแสไหลได้ทางเดียว เช่นวงจรทบระดับหรือวงจรทอน-ทบระดับเป็นต้น เพราะว่วงจรเหล่านี้กระแสด้านเข้าไม่สามารถเป็นค่าลบได้ ดังนั้นในช่วงใกล้ๆกระแสผ่านศูนย์ ต้องมีการกำหนดแถบฮิสเตอร์ซิสขอบเขตต่างไม่ให้น้อยกว่าศูนย์ ซึ่งก็ทำให้แถบฮิสเตอร์ซิสบริเวณกระแสผ่านศูนย์มีค่าต่ำมาก เป็นผลให้ความถี่การสวิตช์จึงสูงขึ้นมา เพื่อตัดปัญหานี้ เราจึงต้องมีการจำกัดความถี่การสวิตช์ไม่ให้เกินค่าๆหนึ่ง หากเกินเราจะทำการหยุดสวิตช์ อันจะทำให้กระแสด้านเข้าเพิ่มขึ้นไป แต่เนื่องจากในวงจรที่สร้างขึ้น กระแสสามารถไหลได้สองทาง ดังนั้นจึงสามารถใช้การควบคุมกระแสด้านเข้าแบบฮิสเตอร์ซิสที่มีแถบฮิสเตอร์ซิสคงตัวได้ โดยจะไม่เกิดความเพี้ยนของกระแสในบริเวณกระแสผ่านศูนย์ วงจรควบคุมกระแสด้านเข้าแบบฮิสเตอร์ซิสที่มีแถบฮิสเตอร์ซิสคงตัวแสดงไว้ในรูปที่ 2.18

แรงดันที่ขาอินพุตแบบ ไม่กลับเฟส จะเป็นแรงดันที่ได้จากการแบ่งแรงดันเอาต์พุต ( $V_o$ ) มาด้วยอัตราส่วน  $R3/(R3+R4)$  ดังนั้นแรงดันเอาต์พุตจะแปรค่าอยู่สองค่าคือ  $+(V_o \cdot R3/(R3+R4))$  กับ  $-(V_o \cdot R3/(R3+R4))$  และแถบฮิสเตอร์ซิสจะมีค่าเท่ากับ  $2 \cdot V_o \cdot R3/(R3+R4)$  โดยแปรค่าอยู่รอบๆค่าศูนย์

แรงดันที่ขั้วเข้าแบบกลับเฟสของออปแอมป์ OP1 เป็นผลต่างของแรงดันคำสั่งที่มีรูปคลื่นไซน์กับแรงดันที่ได้จากการตรวจจับกระแสด้านเข้า

ออปแอมป์ OP1 จะมีการต่อให้ให้มีการป้อนกลับแบบบวกผ่าน  $R3+R4$  เพื่อให้ทำหน้าที่เป็นวงจรเปรียบเทียบกับสัญญาณที่มีความกว้างของแถบฮิสเตอร์ซิสเท่ากับ  $2(V_o \cdot R3/(R3+R4))$

ทั้งนี้การควบคุมกระแสจะถูกตั้งที่ต่อเมื่อ แรงดัน ( $v_s + v_{c2}$ ) มีค่ามากกว่าศูนย์ ตลอดคาบ ความถี่สายกำลัง เพราะแรงดันนี้ทำให้กระแส  $i_L$  มีความลาดชันเป็นบวก (ดูรูปที่ 2.18) และแรงดัน ( $v_{c1} - v_s$ ) มีค่ามากกว่าศูนย์ตลอดคาบความถี่สายกำลัง เพราะแรงดันนี้ทำให้กระแส  $i_L$  มีความลาดชันเป็นลบ (ดูรูปที่ 2.18)

### การจำลองการทำงาน

ได้มีการจำลองการทำงานของวงจรโดยคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม LEK (เอกชัย ภิลาศรีมี,2534) จำลองการทำงานของวงจรในระดับการสวิตช์จริง และใช้โปรแกรม MATLAB with SIMULINK จำลองการทำงานของวงจรในระดับการใช้สมการของค่าเฉลี่ยเฉพาะที่ของตัวแปรสถานะของวงจร ซึ่งเป็นการจำลองการทำงานของวงจรแบบที่รองความถี่การสวิตช์ทิ้งแล้ว โดยมีเงื่อนไขการทำงานของวงจรดังนี้

แรงดันด้านเข้าของวงจร ( $V_s$ ) มีค่าเท่ากับ 310 V. , ความถี่ 50 Hz. , แดบฮิสเตอร์เรซิสของ กระแสด้านเข้า ( $\Delta i_s = \Delta i_L$ ) มีค่าเท่ากับ 2 A. , แรงดันด้านออกของวงจร ( $v_o$ ) มีค่าเท่ากับ 50 V. , กำลังด้านออกของวงจร ( $P_o$ ) มีค่าเท่ากับ 500 W. , ตัวเหนี่ยวนำด้านเข้าของวงจร (L) มีค่าเท่ากับ 5 mH. , ตัวเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กของหม้อแปลง (Lm) มีค่าเท่ากับ 5 mH. , ตัวเหนี่ยวนำรั่วไหลของ หม้อแปลง ( $L_{leakage}$ ) มีค่าเท่ากับ 10  $\mu$ H. , อัตราการแปลงแรงดันของหม้อแปลง T (N) มีค่าเท่ากับ 0.35 , ตัวเก็บประจุ C1 และ C2 มีค่าเท่ากับ 20  $\mu$ F. , ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองด้านออก (Lf) มีค่าเท่ากับ 100 mH. (เพื่อให้ตรงกับสมมุติฐานที่ตั้งไว้ว่ากระแสด้านออกคงตัว) , ตัวเก็บประจุวงจรกรอง ด้านออก (Cf) มีค่าเท่ากับ 10  $\mu$ F. และความต้านทานโหลด (R) มีค่าเท่ากับ 5  $\Omega$

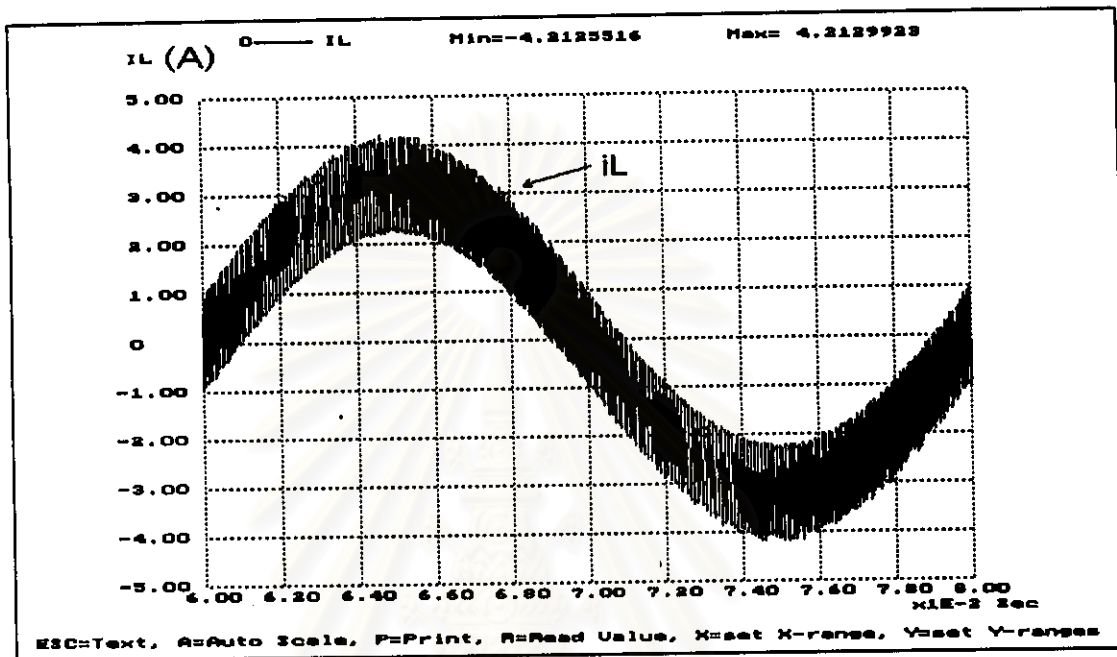
$$\text{จากสูตรดุลพลังงาน } \frac{v_{in} i_m}{2} = \frac{\langle v_{out} \rangle^2}{R_{load}} = P_{out}$$

$$\text{ดังนั้นกระแสด้านเข้า } \overline{i_s} = \overline{i_L} \text{ มีค่าสอดคล้องกับ } \frac{2 \cdot P_o}{v_{in}} = 3.226 \text{ A.}$$

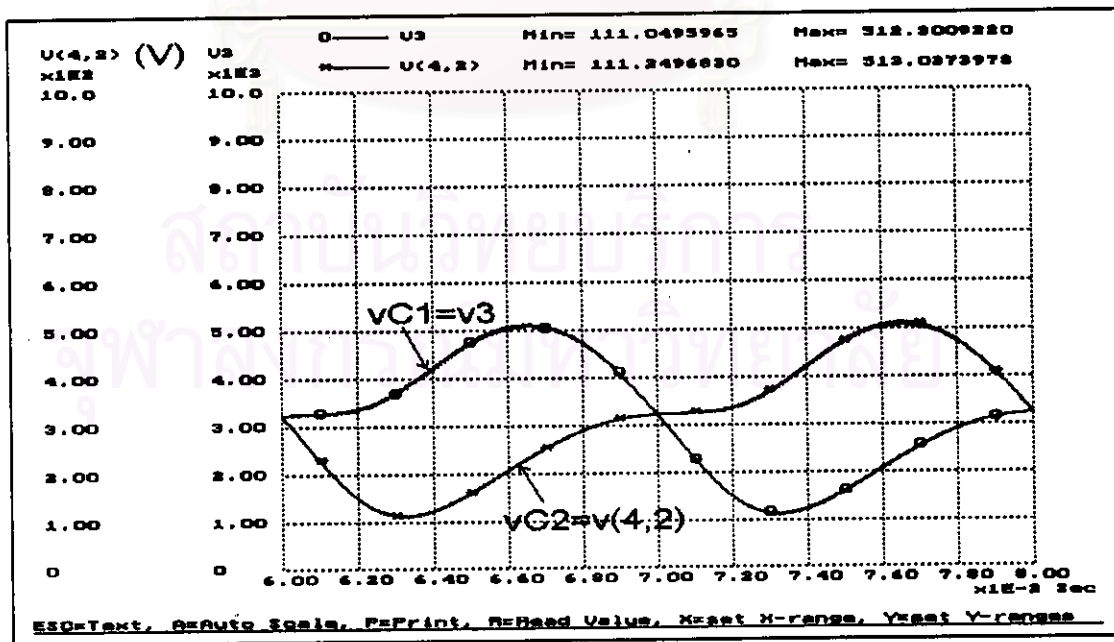
สำหรับวงจรควบคุมจะออกให้มีแดบฮิสเตอร์เรซิสของกระแสด้านเข้า 2 A. โดยการเลือกค่า R3 เท่ากับ 1 k $\Omega$ . R4 เท่ากับ 19 k $\Omega$  เพื่อให้แรงดันที่ขั้วไม่กลับเฟสของออปแอมป์ OP1 มีค่าเท่ากับ +/-1 V. ( $V_o$  ของออปแอมป์ OP1 กำหนดให้เท่ากับ 10 V.) และเลือกใช้อัตราส่วนการแปลง กระแสของหม้อแปลงกระแสเท่ากับ 1000 ต่อ 1 ดังนั้นจึงต้องใช้ R2 ค่าเท่ากับ 500  $\Omega$ . และ R1 มีค่าเท่ากับ 96.094 k $\Omega$ .

## ผลการจำลองการทำงานโดยโปรแกรม LEK

ได้นำวงจรในรูปที่ 2.18 มาทำการจำลองการทำงาน โดยออกแบบให้วงจรควบคุมกระแส ด้านเข้าแบบฮิสเทอรีซิสที่มีแถบฮิสเทอรีซิสคงตัว ได้ผลการจำลองการทำงานดังนี้

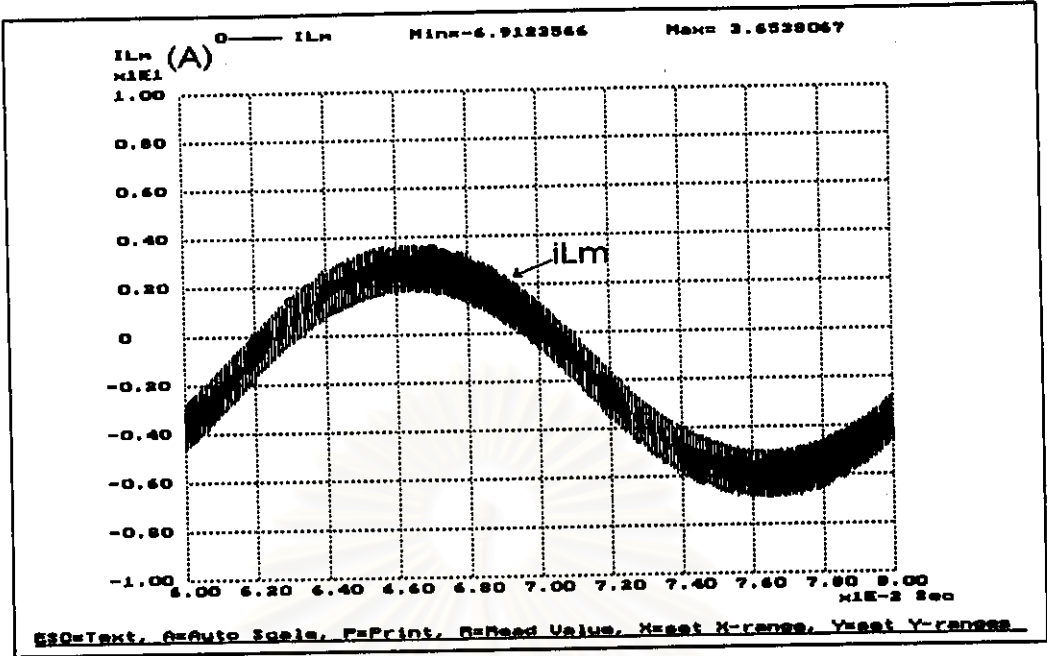


รูปที่ 2.20 กระแสด้านเข้าของวงจรเรียงกระแสแบบวิธีสวิตช์

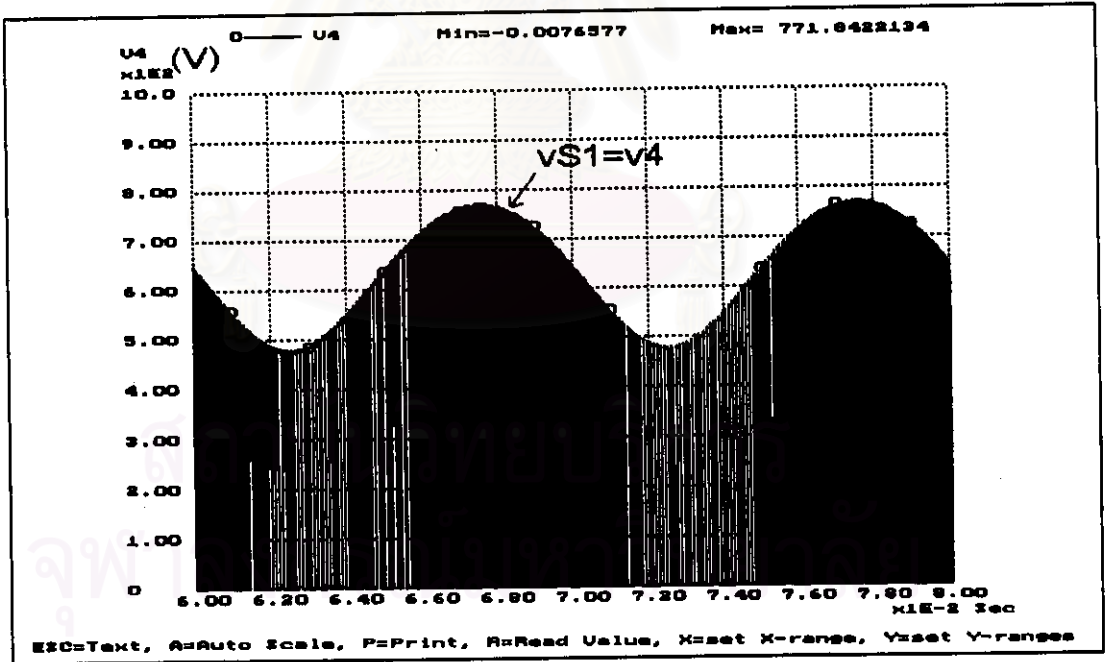


รูปที่ 2.21 แรงดันของตัวเก็บประจุ C1 และ C2

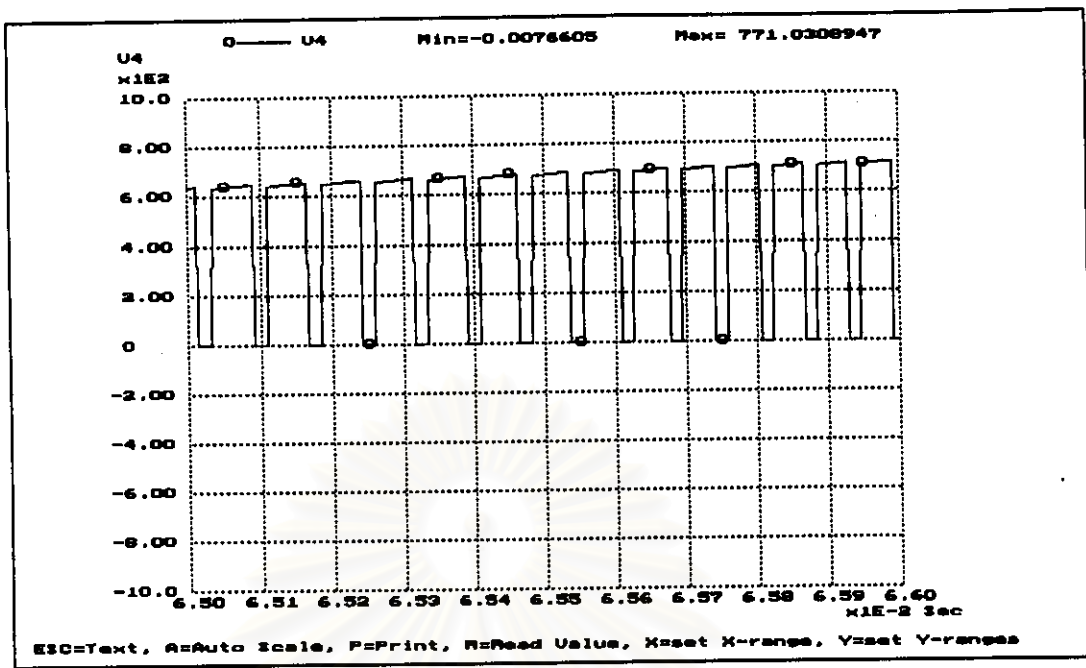




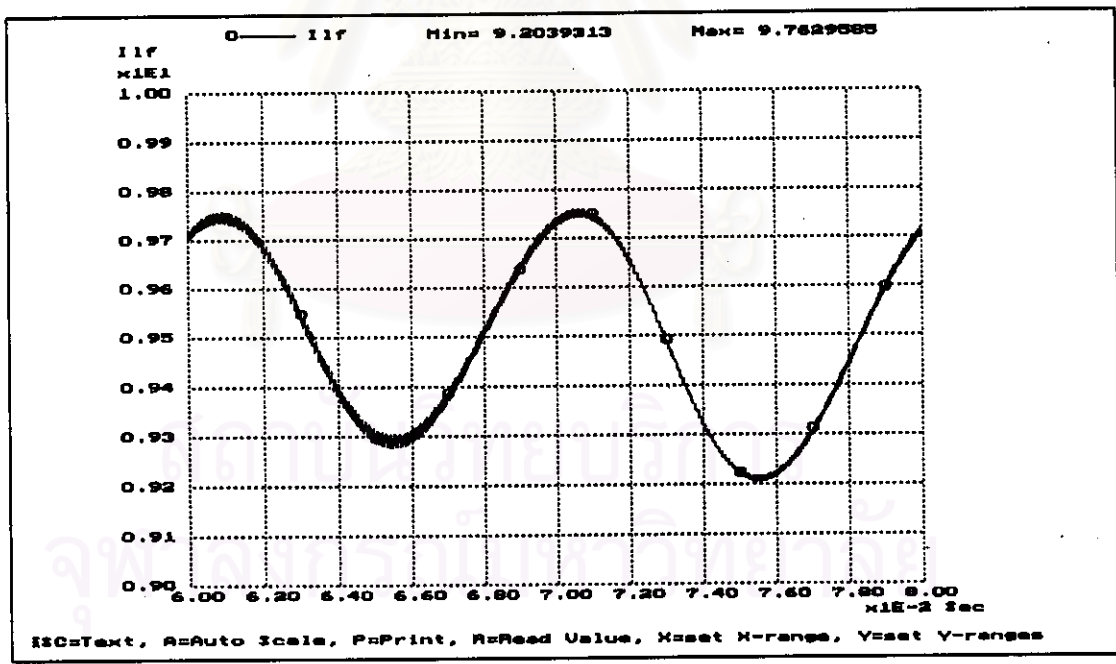
รูปที่ 2.22 กระแสทำแม่เหล็กของหม้อแปลงจรเรียงกระแสแบบวิธีสวิตซ์



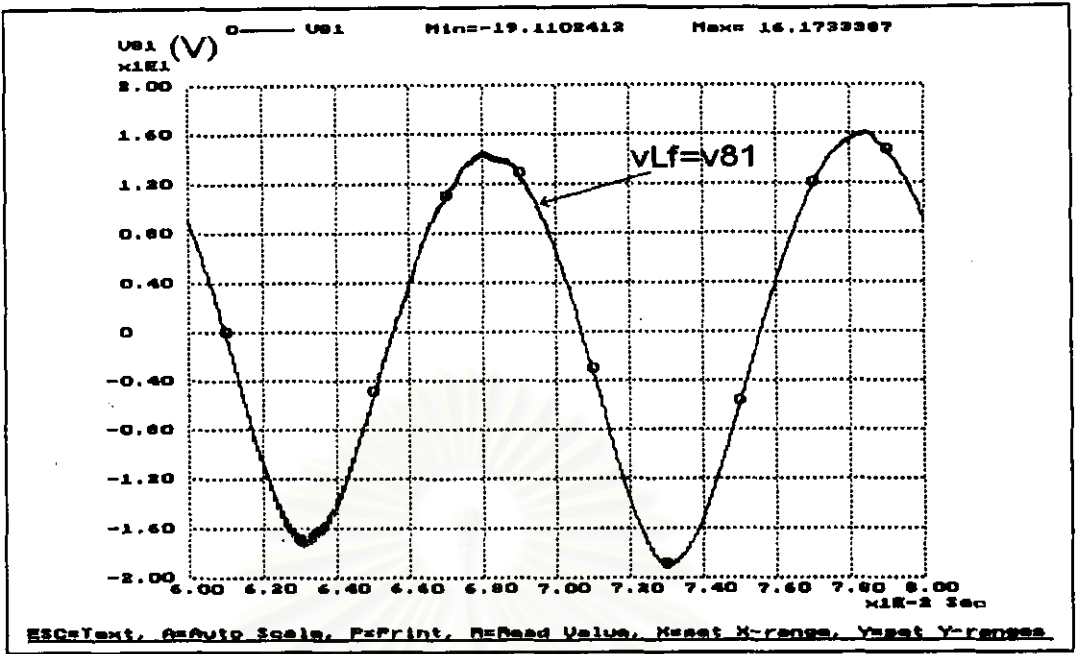
รูปที่ 2.23 แรงดันคร่อมสวิตซ์ S1



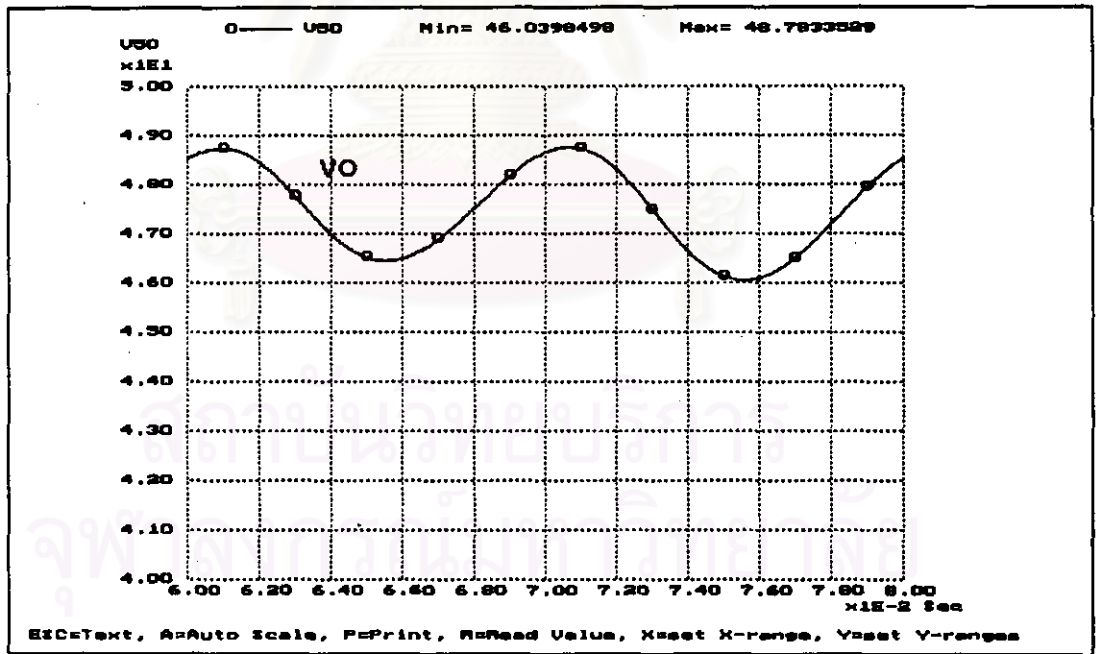
รูปที่ 2.24 รูปขยายแรงดันตกคร่อมสวิทช์ S1



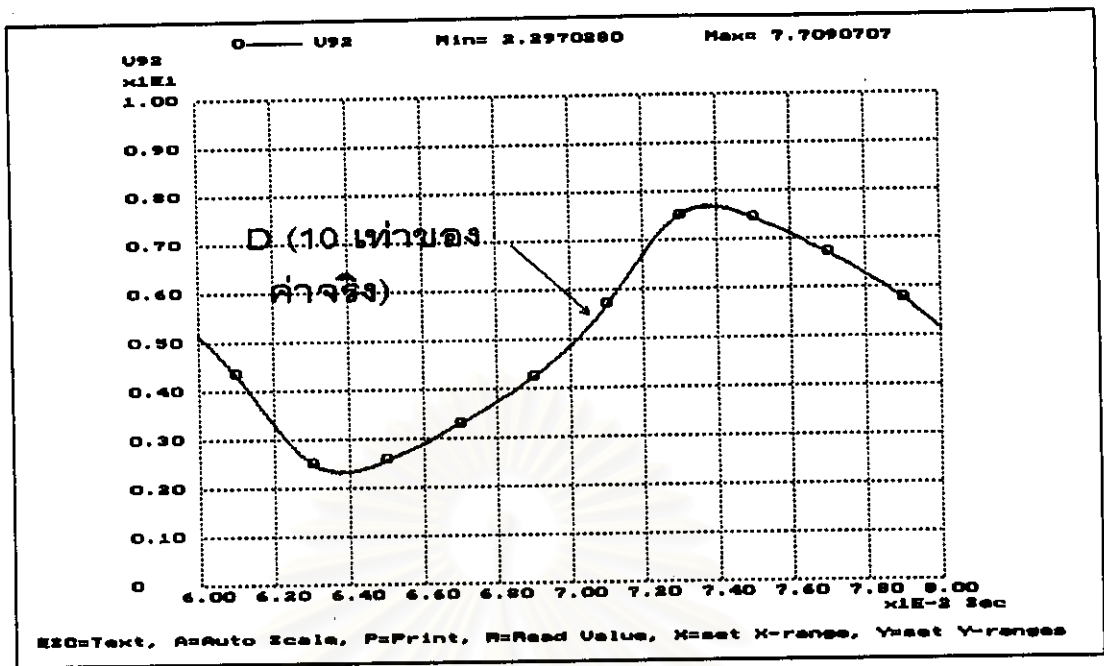
รูปที่ 2.25 กระแสตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองด้านออก (Lf)



รูปที่ 2.26 แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองด้านออก (L)



รูปที่ 2.27 แรงดันด้านออก ( $v_0$ )



รูปที่ 2.28 วัฏจักรงาน (D)

รูปที่ 2.20 แสดงกระแสด้านเข้าของวงจรเรียงกระแสแบบวิธีสวิตช์ รูปคลื่นของกระแสด้านนี้มีรูปร่างใกล้เคียงไซน์ โดยมีกระแสองค์ประกอบความถี่สูง(ความถี่การสวิตช์)ซ้อนอยู่บนกระแสองค์ประกอบความถี่ต่ำ (ความถี่สายกำลัง 50 Hz) ซึ่งเกิดจากการควบคุมกระแสด้านเข้าแบบฮิสเตอร์เรซิสที่มีแถบฮิสเตอร์เรซิสคงตัว โดยมีค่ายอดของกระแสเฉลี่ย ( $\bar{i}_S = \bar{i}_L$ ) มีค่าประมาณ 3.226 A. ตามที่ได้กำหนดไว้ และมีฮิสเตอร์เรซิสของกระแสด้านเข้าเท่ากับ 2 A. โดยที่ค่าเฉลี่ยของกระแสด้านเข้ามีเฟสตรงกับแรงดันด้านเข้า

รูปที่ 2.21 แสดงรูปคลื่นแรงดันของตัวเก็บประจุ C1 และ C2 แรงดันทั้งสองนี้มีค่ายอดประมาณ 512 V. และค่าต่ำสุดประมาณ 111 V. โดยแรงดันนี้มีค่าองค์ประกอบไฟตรงประมาณ 300 V. ซึ่งก็ใกล้เคียงกับที่คำนวณโดยสมการที่ 2.14 ที่มีค่าเท่ากับ 285 V. รูปคลื่นแรงดันของตัวเก็บประจุ C1 จะมีค่าค่อยๆเพิ่มขึ้นในช่วงที่แรงดันด้านเข้าเป็นบวก (0 - 10 ms., 0 -  $\pi$ ) เนื่องจากค่าวัฏจักรงานในช่วงที่แรงดันด้านเข้าเป็นบวกจะมีค่าน้อยกว่า 0.5 ซึ่งก็ทำให้ช่วงเวลาที่ตัวเก็บประจุ C1 ถ่ายพลังงาน (ช่วง D) มีน้อยกว่าช่วงเวลาที่ตัวเก็บประจุ C1 รับพลังงาน (ช่วง D') ดังนั้นแรงดันของตัวเก็บประจุ C1 จะมีค่าค่อยๆเพิ่มขึ้นในช่วงที่แรงดันด้านเข้าเป็นบวก ส่วนรูปคลื่นแรงดันของตัวเก็บประจุ C2 จะมีค่าค่อยๆลดลงในช่วงที่แรงดันด้านเข้าเป็นบวก เนื่องจากช่วงเวลาที่ตัวเก็บประจุ C2 ถ่ายพลังงาน (ช่วง D') มีมากกว่าช่วงเวลาที่ตัวเก็บประจุ C2 รับพลังงาน (ช่วง D) ดังนั้นแรงดันของตัวเก็บประจุ C1 จะมีค่าค่อยๆเพิ่มขึ้นในช่วงที่แรงดันด้านเข้าเป็นบวก ส่วนในกรณีที่แรงดันเข้ามีค่าเป็นลบ (10-20 ms.,  $\pi$  - 2 $\pi$ ) ก็สามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกัน

รูปที่ 2.22 แสดงรูปคลื่นกระแสทำแม่เหล็กของหม้อแปลง T มีรูปคลื่นโกล์ไซน์ โดยที่ค่ายอดถึงค่ายอดของกระแสทำแม่เหล็กของหม้อแปลงเฉลี่ย จะมีค่าโกล์เดียวกับค่ายอดถึงค่ายอดของกระแสด้านเข้าเฉลี่ย รูปคลื่นของกระแสแสดงให้เห็นว่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กของหม้อแปลงมีค่าองค์ประกอบไฟตรง เนื่องจากกระแสที่เข้าหม้อแปลงไม่สมมาตร (เท่ากับ  $(N\overline{i_{L_f}} + \overline{i_{L_m}})$  ในช่วง D และเท่ากับ  $\overline{i_{L_m}}$  ในช่วง D') จึงต้องมีค่าองค์ประกอบไฟตรงของกระแสทำแม่เหล็ก เพื่อให้เกิดดุลโวลต์-วินาที (volt-sec balance) ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำร่วไหลของหม้อแปลงและความต้านทานของเส้นลวดของหม้อแปลงได้ดุล โดยมีค่าองค์ประกอบไฟตรงประมาณ -1.62 A. ซึ่งก็โกล์เดียวกับที่คำนวณโดยสมการที่ 2.15 ที่มีค่าเท่ากับ -1.75 A.

รูปที่ 2.23 แสดงแรงดันตกคร่อมสวิตช์ S1 โดยค่ายอดของแรงดันคร่อมสวิตช์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่าแรงดัน  $v_{C1} + v_{C2}$  โดยมีค่าสูงสุดประมาณ 771 V. และไม่มีแรงดันยอดแหลมตกคร่อมสวิตช์ดังจะเห็นได้จากรูปขยายในรูปที่ 2.24

รูปที่ 2.24 แสดงแรงดันตกคร่อมสวิตช์ จากรูปจะเห็นได้ว่าแรงดันตกคร่อมสวิตช์ในขณะที่เริ่มหยุดนำกระแส ไม่มีแรงดันยอดแหลมอันเนื่องมาจากผลของความเหนี่ยวนำร่วไหลของหม้อแปลง ซึ่งนับว่าเป็นข้อดีของวงจรที่ไม่จำเป็นต้องใช้วงจร snubber เพื่อระงับแรงดันยอดแหลมอันเนื่องมาจากผลของความเหนี่ยวนำร่วไหลของหม้อแปลง

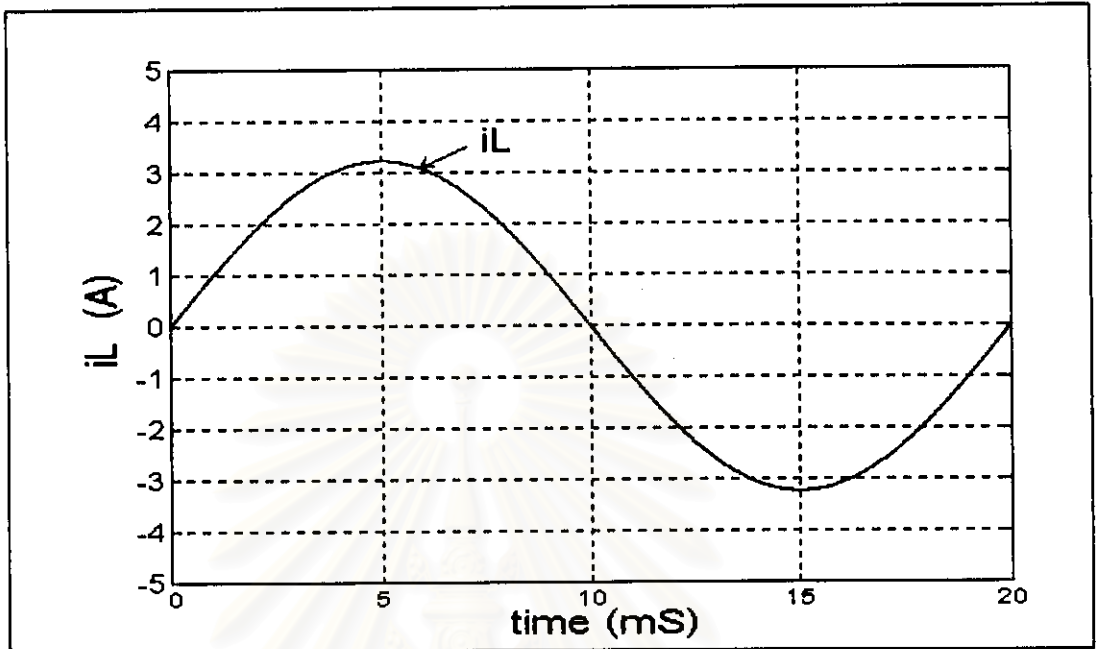
รูปที่ 2.25 แสดงรูปคลื่นของกระแสตัวเหนี่ยวนำของวงจรรองด้านออก ( $i_{L_r}$ ) ซึ่งจะเท่ากับกระแสโหลด  $\langle i_{L_r} \rangle = \langle i_o \rangle$  โดยมีค่ากระแสกระเพื่อมความถี่ 100 Hz อันเนื่องมาจากแรงดันกระเพื่อมของตัวเก็บประจุ C1 และการแปรค่าของวัฏจักรงาน กระแสตัวเหนี่ยวนำของวงจรรองด้านออกมีค่าเฉลี่ยประมาณ 9.5 A.

รูปที่ 2.26 แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำของวงจรรองด้านออก ( $v_{L_r}$ ) เป็นแรงดันค่าเฉลี่ยที่ทรงความถี่การสวิตช์ออกแล้ว แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำของวงจรรองด้านออกจะมีดุลโวลต์-วินาทีในทุกๆ ครั้งคาบความถี่สายกำลัง

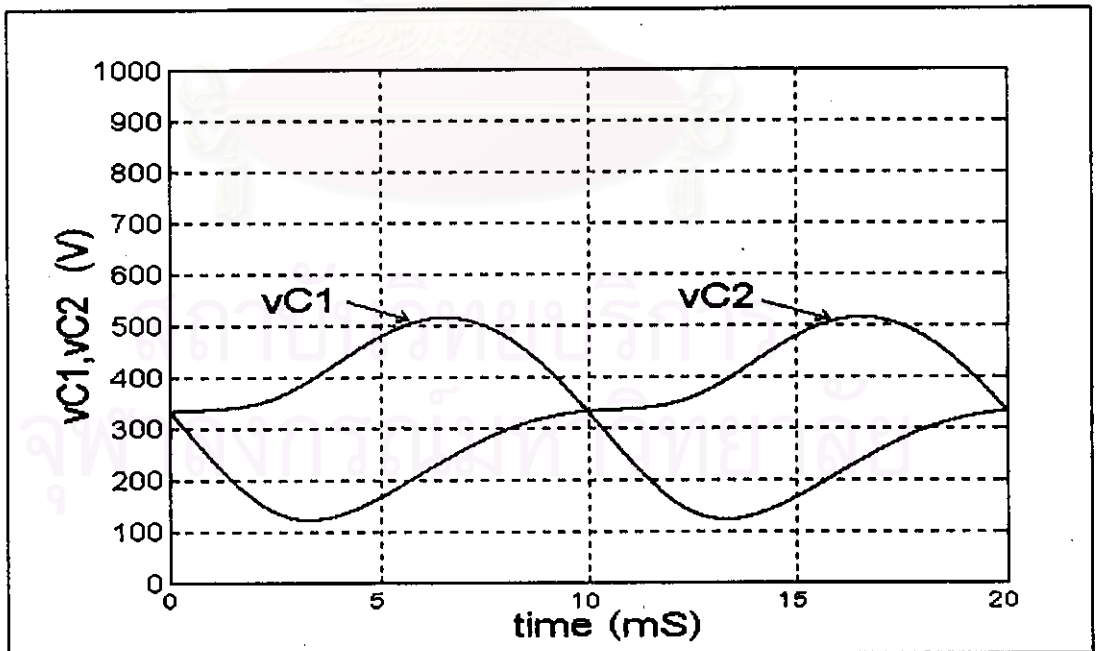
รูปที่ 2.27 แสดงรูปคลื่นแรงดันด้านออก ( $v_o$ ) ซึ่งมีค่าแรงดันกระเพื่อมความถี่ 100 Hz. เนื่องมาจากกระแสตัวเหนี่ยวนำของวงจรรองด้านออกมีค่ากระแสกระเพื่อม แรงดันด้านออกมีค่าเฉลี่ยประมาณ 47.3 V. การที่แรงดันด้านออกมีค่าเฉลี่ยไม่เท่ากับแรงดันที่คำนวณไว้เนื่องจากการจำลองการทำงานได้มีขีดการสูญเสียในตัวอุปกรณ์เช่น ไดโอด, สวิตช์ เป็นต้น ไว้ด้วย

รูปที่ 2.28 แสดงวัฏจักรงาน (D) ของวงจร ที่แปรค่ารอบๆ 0.5 วงจรต้องมีการแปรค่าวัฏจักรงานเพื่อให้กระแสด้านเข้ามีรูปคลื่นโกล์ไซน์ โดยในช่วงที่แรงดันเข้าเป็นบวก วัฏจักรงานจะมีค่าน้อยกว่า 0.5 เพื่อให้อัตราการแปลงผัน มีค่าเป็นบวก และในช่วงที่แรงดันเข้าเป็นลบ วัฏจักรงานจะมีค่ามากกว่า 0.5 เพื่อให้อัตราการแปลงผัน มีค่าเป็นลบ ตามสมการที่ 2.4 วัฏจักรงานจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.5

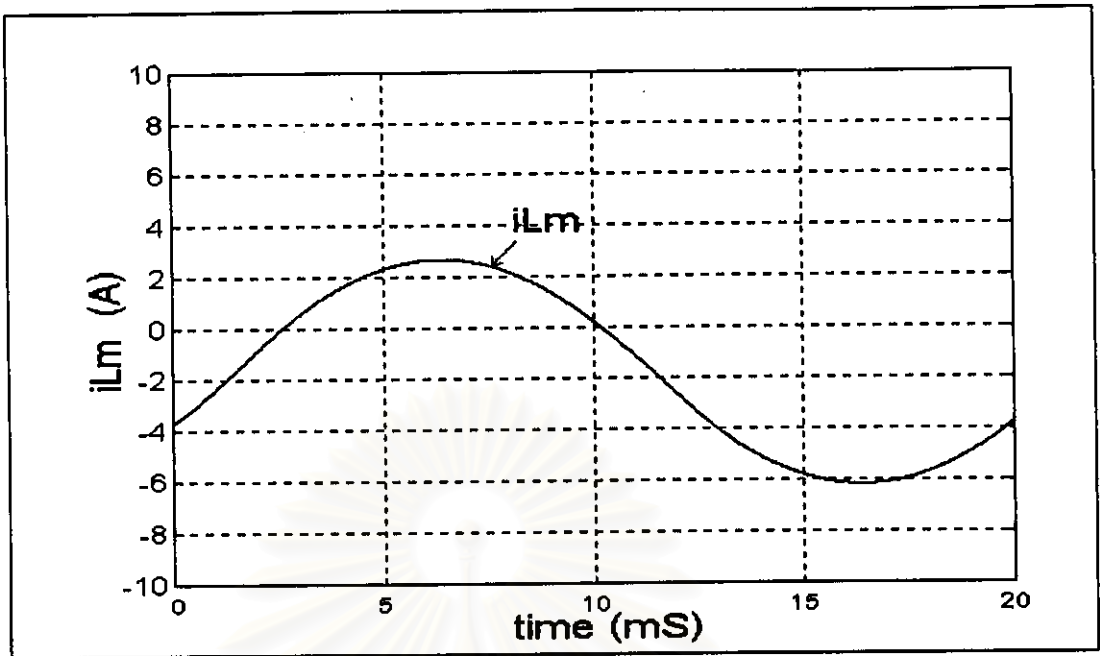
ผลการจำลองการทำงานโดยโปรแกรม MATLAB with SIMULINK



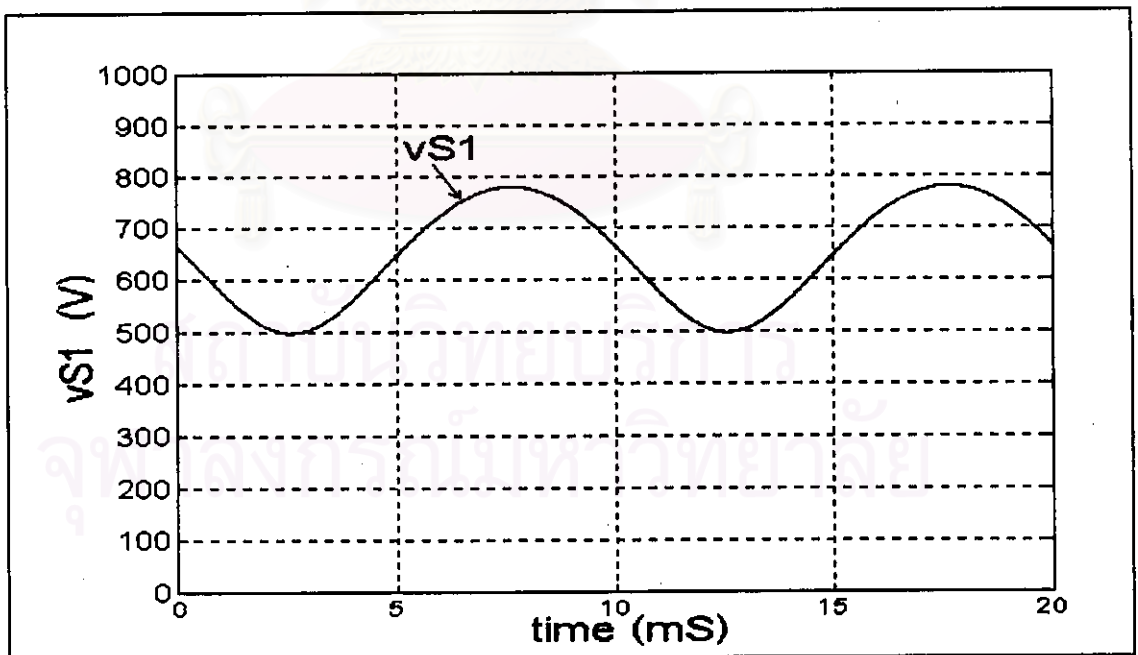
รูปที่ 2.29 กระแสด้านเข้าของวงจรเรียงกระแสแบบวีธีสวิตช์



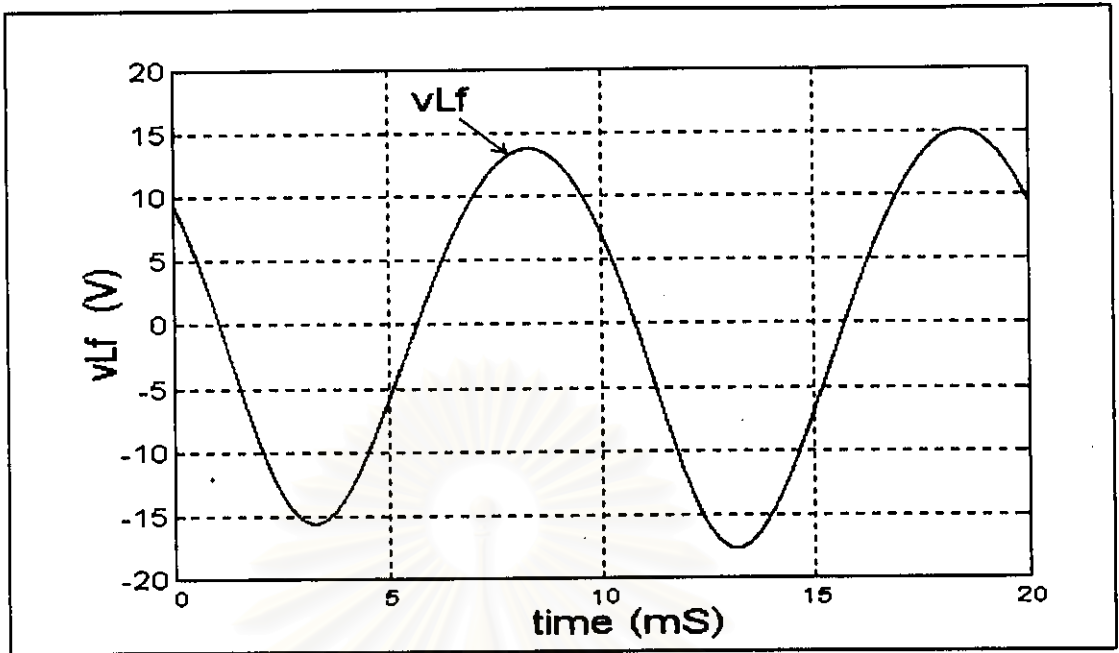
รูปที่ 2.30 แรงดันของตัวเก็บประจุ  $C1$  และ  $C2$



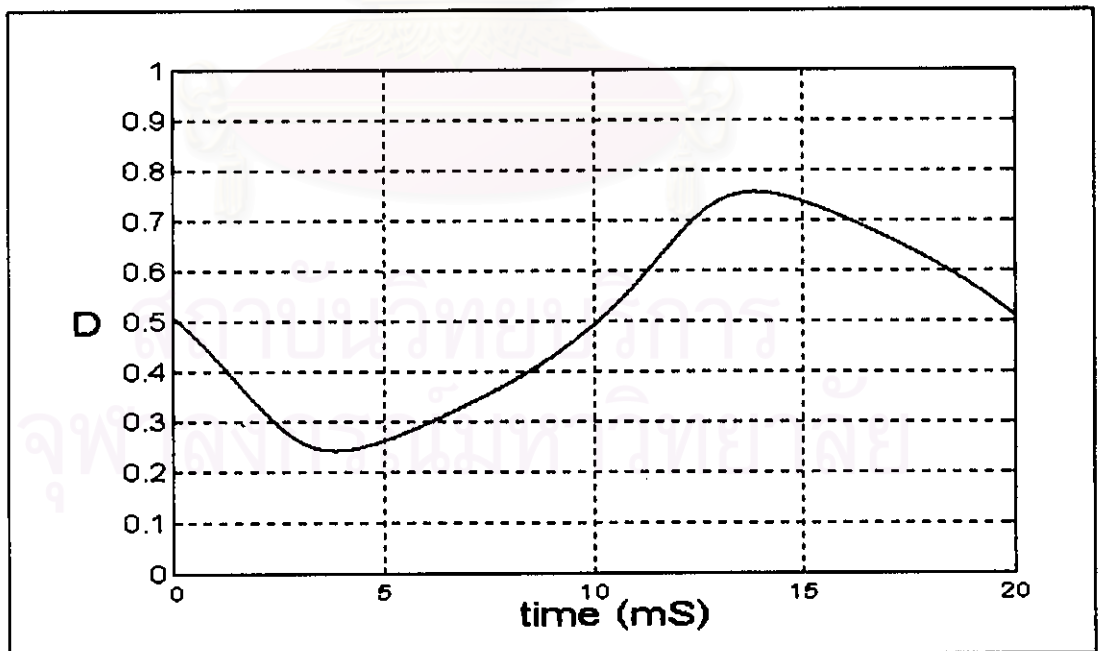
รูปที่ 2.31 กระแสทำแม่เหล็กของหม้อแปลง ( $i_{Lm}$ )



รูปที่ 2.32 ค่าเฉลี่ยเฉพาะที่ของแรงดันคั่นคกรวมสวิตช์ในขณะหยุดนำกระแส

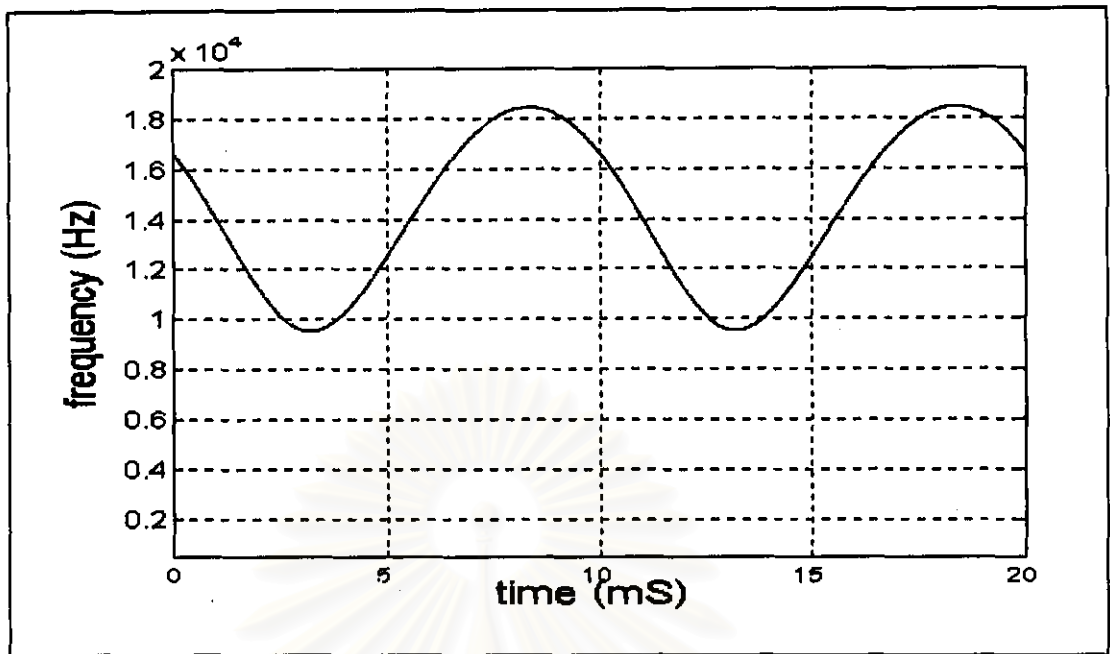


รูปที่ 2.33 แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองด้านออก (Lf)



รูปที่ 2.34 วัฏจักรงาน (D)





รูปที่ 2.35 การแปรค่าความถี่การสวิตช์ของวงจร

รูปที่ 2.29 แสดงรูปคลื่นกระแสต้านเข้าของวงจรเรียงกระแสแบบวิธีสวิตช์ที่มีการกรองความถี่การสวิตช์ออกแล้ว มีรูปคลื่นโวลต์ไซน์ โดยมีค่ายอดเท่ากับ 3.226 A. ตามที่ได้ออกแบบไว้

รูปที่ 2.30 แสดงแรงดันของตัวเก็บประจุ C1 และ C2 ที่มีการกรองความถี่การสวิตช์ออกแล้ว ซึ่งมีค่าสูงสุด 515 V. และค่าต่ำสุด 123 V. โดยมีรูปร่างและขนาดใกล้เคียงกับรูปคลื่นที่ได้จากการจำลองการทำงานโดย โปรแกรม LEK

รูปที่ 2.31 แสดงรูปคลื่นกระแสทำแม่เหล็กของหม้อแปลง ที่มีการกรองความถี่การสวิตช์ออกแล้ว ค่ายอดของค่าเฉลี่ยด้านบวกเท่ากับ 2.6675 A. และค่ายอดของค่าเฉลี่ยทางด้านลบเท่ากับ  $-6.1675$  A. และมีค่าองค์ประกอบไฟตรงเท่ากับ  $-1.75$  A. โดยมีรูปร่างและขนาดใกล้เคียงกับรูปคลื่นที่ได้จากการจำลองการทำงานโดย โปรแกรม LEK

รูปที่ 2.32 รูปคลื่นของแรงดันตกคร่อมสวิตช์ S1 ในขณะหยุดนำกระแส ที่มีการกรองความถี่การสวิตช์ออกแล้ว มีค่าสูงสุดเท่ากับ 780 V. โดยมีรูปร่างและขนาดใกล้เคียงกับรูปคลื่นที่ได้จากการจำลองการทำงานโดย โปรแกรม LEK

รูปที่ 2.33 รูปคลื่นของแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองด้านออก ( $i_L$ ) ที่มีการกรองความถี่การสวิตช์ออกแล้ว มีค่าสูงสุดทางบวกเท่ากับ 15.05 V. และสูงสุดทางด้านลบเท่า

กับ 17.68 V. โดยมีรูปร่างและขนาดใกล้เคียงกับรูปคลื่นที่ได้จากการจำลองการทำงานโดยโปรแกรม LEK

รูปที่ 2.34 วัฏจักรงาน (D) ของวงจรถ่ายค่าอยู่ระหว่าง 0.2426 ถึง 0.7574 โดยมีค่ากลางเท่ากับ 0.5 โดยมีรูปร่างและขนาดใกล้เคียงกับรูปคลื่นที่ได้จากการจำลองการทำงานโดยโปรแกรม LEK

รูปที่ 2.35 การแปรค่าความถี่การสวิตช์ของวงจรถ่ายค่าอยู่ระหว่าง 9.54 kHz. กับ 18.447 kHz. โดยมีค่ากลางของความถี่การสวิตช์เท่ากับ 14 kHz.

จากผลการจำลองการทำงานโดยใช้สมการเฉลี่ยเฉพาะที่ของตัวแปรสถานะ โดยโปรแกรม MATLAB with SIMULINK พบว่ามีรูปร่างและขนาดใกล้เคียงกับรูปคลื่นที่ได้จากการจำลองการทำงานโดยโปรแกรม LEK ซึ่งแสดงว่าสมการค่าเฉลี่ยเฉพาะที่ของตัวแปรสถานะจะนำมาใช้ได้ โดยเฉพาะในการวิเคราะห์และออกแบบวงจรต่อไป



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย