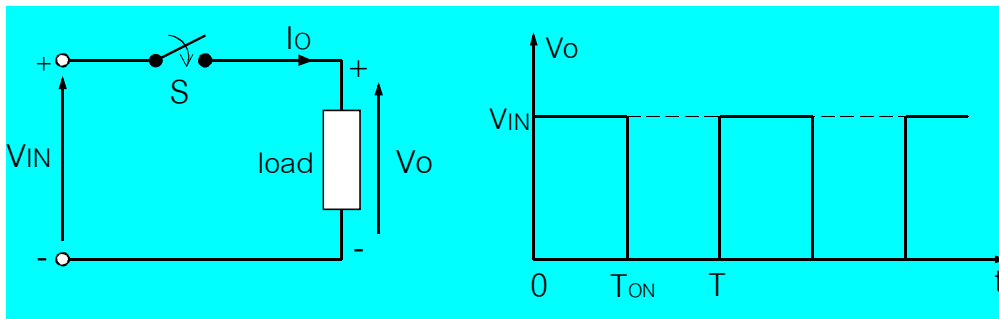


3. DC-DC CONVERTER

โดย อาจารย์วิโรจน์ เพชรพันธุ์ศรี

3.1 DC-DC converter หรือ DC chopper เป็นวงจรที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า DC จากแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีค่าคงที่ ให้ได้แรงดันเอาต์พุต DC ที่สามารถปรับค่าได้ตามที่ต้องการ โดยใช้หลักการ ON และ OFF อิเล็กทรอนิกส์สวิตช์ หรือ chopping DC voltage โดยทั่วไปจะนำไปใช้ในงานต่อไปนี้ รถยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้าจาก battery รถ forklift hoist ในเรือสินค้า DC voltage regulator ประสิทธิภาพสูง เป็นต้น การ ON และ OFF อิเล็กทรอนิกส์สวิตช์มีวิธีการ 2 แบบคือ



รูปที่ 3.1 หลักการของวงจร DC – DC converter

การ ON และ OFF อิเล็กทรอนิกส์สวิตช์มีวิธีการ 2 แบบคือ

1. แบบ Constant – frequency เป็นวงจร chopper ที่ควบคุมให้ time period (T) คงที่ แล้วปรับเวลา ON time (TON) การควบคุมในลักษณะนี้เรียกว่า pulse – width – modulation (PWM)
2. แบบ Variable - frequency เป็นวงจร chopper ที่ปรับ time period โดยการปรับ ON time หรือ OFF time (T - TON) การควบคุมแบบนี้เรียกว่า frequency - modulation แต่เนื่องจากการควบคุมในลักษณะนี้ความถี่มีการเปลี่ยนแปลงในย่านกว้างทำให้ยากในการ filter

อิเล็กทรอนิกส์สวิตช์ที่ใช้ในวงจรมีอยู่ 2 แบบคือ

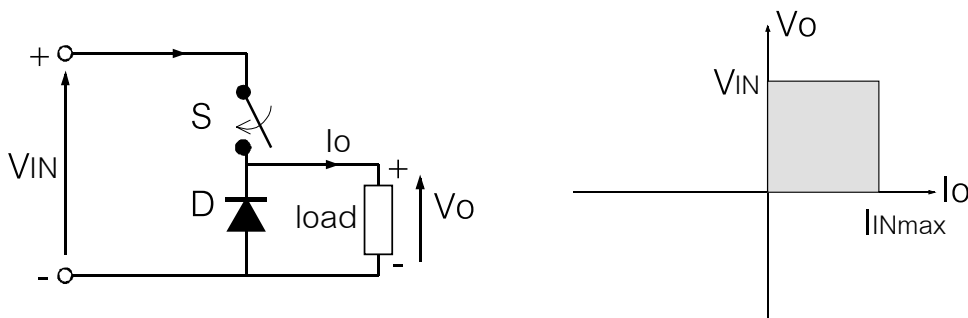
1. แบบที่ทำให้กระแสหยุดไหลด้วยการบีบบังคับ(forced commutation) คือ SCR จะนำมาใช้ในงานความถี่ต่ำ
2. แบบที่ทำให้กระแสหยุดไหลได้ด้วยตัวเอง(self commutation) คือ Power Transistor Power MOSFET GTO และ IGBT จะนำมาใช้ในงานความถี่สูง

DC -DC Converter Drives

เนื่องจากอิเล็กทรอนิกส์สวิตช์และdiodeที่ใช้ในวงจรเป็นอุปกรณ์ที่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ทางเดียว ดังนั้นทิศทางการไหลของกระแสและpolarityของเอาต์พุตvoltageจะถูกกำหนดด้วยชนิดของวงจร chopper ที่นำมาใช้ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

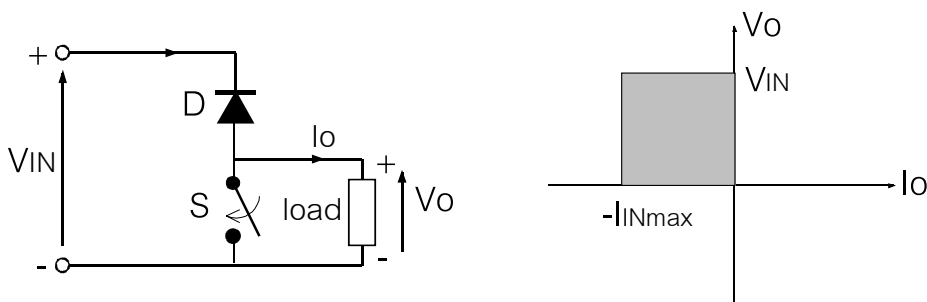
1 Single Quadrant Chopper ในกรณีนี้การทำงานของวงจรจะให้กระแสและแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงอยู่ในquadrantเดียว มีการต่อวงจรอยู่ 2 แบบคือ

- **ชนิด A** เป็นวงจรที่มีการทำงานอยู่ในquadrant I กำลังไฟฟ้าจะไหลจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าไป ยัง load



รูปที่ 3.2 วงจรchopper ชนิด A

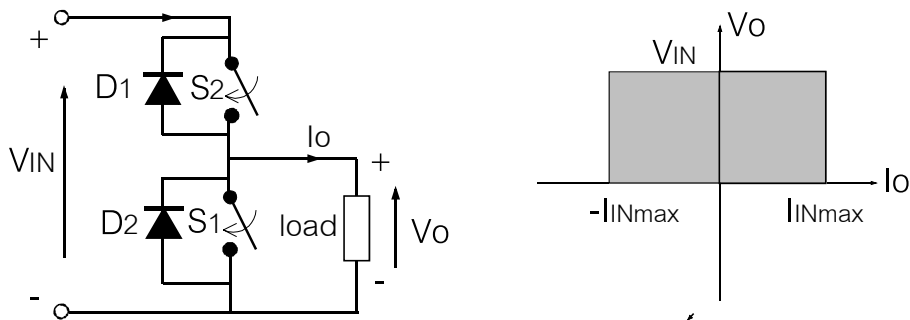
- **ชนิด B** เป็นวงจรที่มีการทำงานอยู่ในquadrant II วงจรชนิดนี้กำลังไฟฟ้าจะไหลออกจาก load จะเกิดใน active load เช่นการสร้าง regenerative braking ของ dc drives



รูปที่ 3.3 วงจร chopper ชนิด B

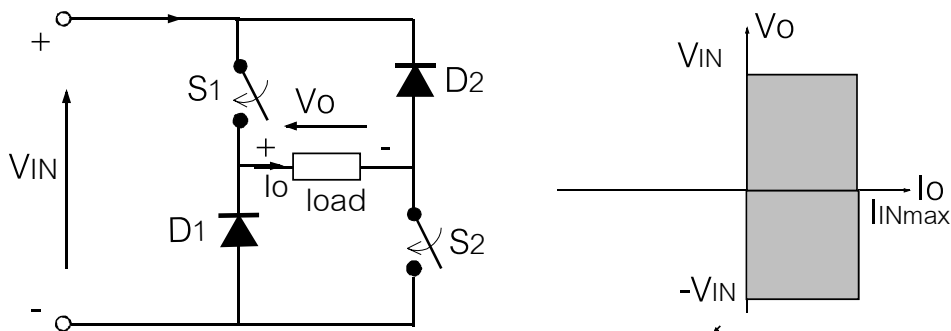
2. Two Quadrant Chopper ในกรณีนี้การทำงานของวงจรจะให้กระแสและแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงอยู่ใน 2 quadrant มีการต่อวงจรอยู่ 2 แบบคือ

-ชนิด C เป็นวงจรที่ทิศทางการไหลของกระแส I_o สามารถเป็นบวกหรือลบได้ เมื่อ S1 หรือ D1 นำกระแส I_o จะเป็นลบ แต่ถ้า S2 หรือ D2 นำกระแส I_o จะเป็นบวก ซึ่งจะมีการทำงานอยู่ใน quadrant I และ II แต่วงจรนี้ถ้า S1 และ S2 ทำงานพร้อมกันจะเกิดการลัดวงจร



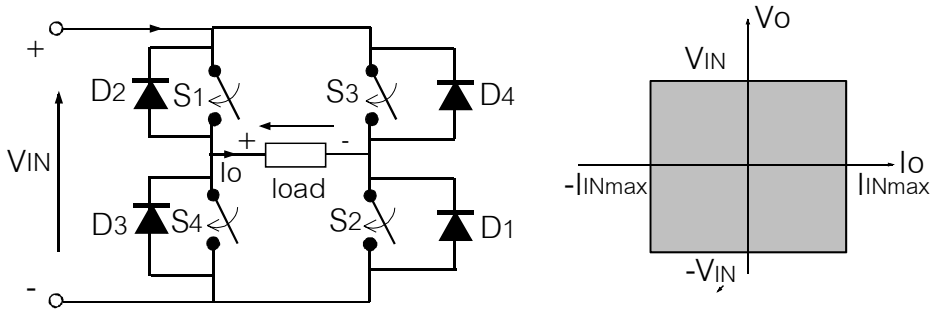
รูปที่ 3.4 วงจร chopper ชนิด C

-ชนิด D เป็นวงจรที่กระแส I_o ไหลได้ทิศทางเดียว แต่แรงดันเอาต์พุตสามารถมี polarity เป็นบวกหรือลบได้ วงจรชนิดนี้จะมีการทำงานอยู่ใน quadrant I และ IV



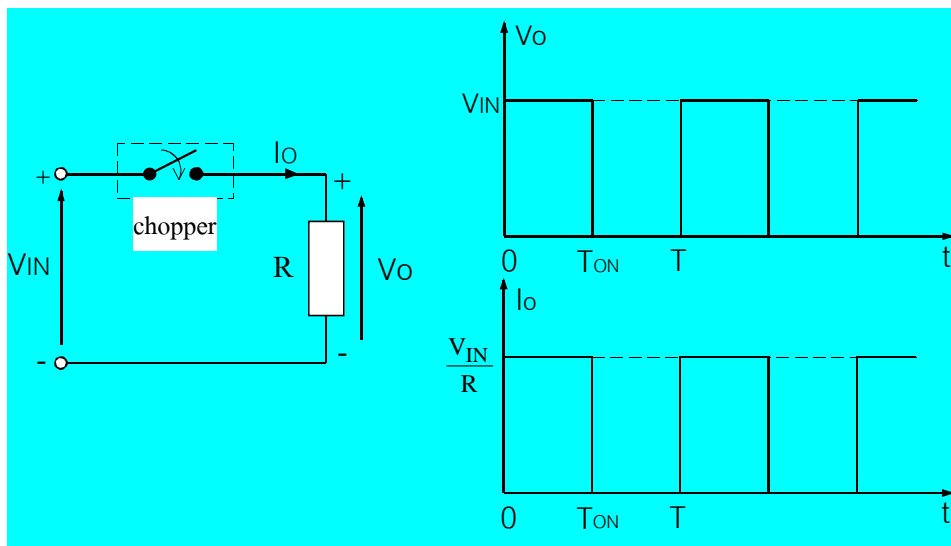
รูปที่ 3.5 วงจร chopper ชนิด D

3. Four Quadrant Chopper (ชนิด E) ในกรณีนี้การทำงานของวงจรจะให้กระแสและแรงดันเปลี่ยนแปลงอยู่ใน 4 Quadrant โดยที่ ถ้า S1 และ S2 ทำงานทิศทางของกระแสและ polarity ของแรงดันจะเป็นบวก (quadrant I) ในขณะที่ถ้า S3 และ S4 ทำงานทิศทางของกระแสและ polarity ของแรงดันจะเป็นลบ (quadrant III) ส่วน quadrant II และ IV จะเป็นการทำงานแบบ regenerative ด้วย D1 กับ D2 และ D3 กับ D4



รูปที่ 3.6 หลักการ chopper ชนิด E

3.2 Chopper with R load หลักการทำงานของวงจร รูปคลื่นของแรงดันเอาต์พุตและกระแสเอาต์พุต เมื่อ load เป็น R ได้แสดงไว้ในรูปที่ 7



รูปที่ 3.7 Step Down Chopper กับ R load

เมื่อ T คือ chopping period

T_{ON} คือ ON time

K คือ duty cycle มีค่าเท่ากับ $\frac{T_{ON}}{T}$

ค่าแรงดันเอาต์พุตเฉลี่ย (V_{AV}) มีค่าเท่ากับ

$$V_{AV} = \frac{1}{T} \int_0^{T_{ON}} v_O dt = \frac{T_{ON}}{T} V_{IN}$$

$$V_{AV} = K V_{IN} \text{ ----- (1)}$$

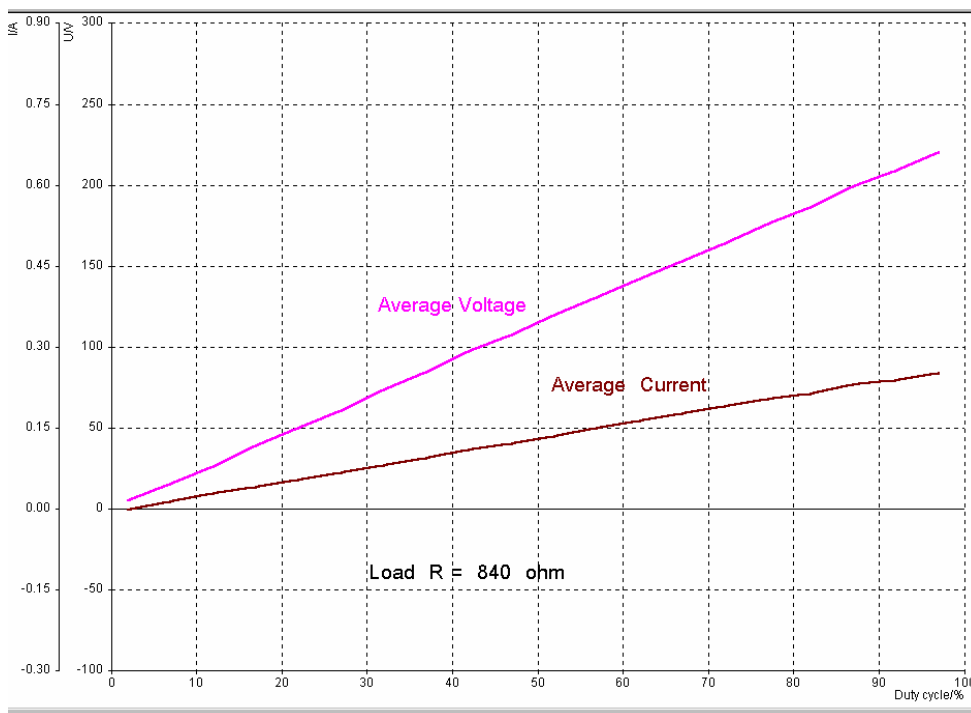
ในลักษณะเช่นเดียวกันค่ากระแสเฉลี่ย (I_{AV}) จะมีค่าเท่ากับ

$$I_{AV} = \frac{V_{AV}}{R} = \frac{KV_{IN}}{R} \dots\dots\dots \text{amp} \text{ ----- (2)}$$

ค่า RMS ของแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเท่ากับ

$$V_{RMS} = \left[\frac{1}{T} \int_0^{KT} v_0^2 dt \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$V_{RMS} = \sqrt{K} V_{IN} \dots\dots\dots \text{volt} \text{ ----- (3)}$$

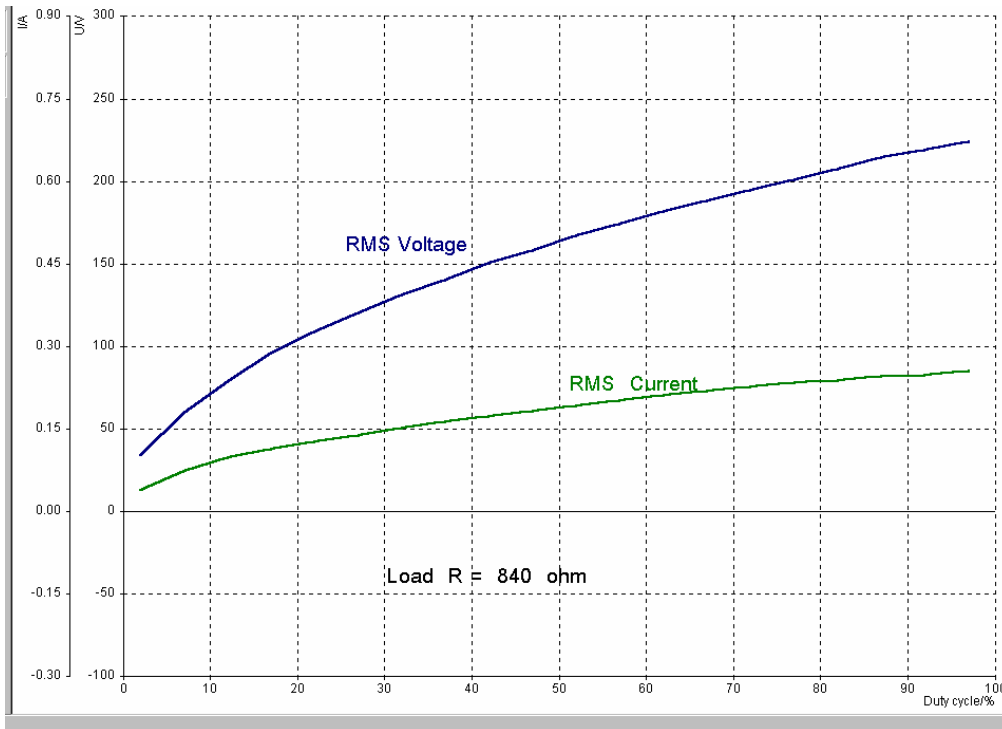


รูปที่ 3.8 Average voltage and current characteristic ของวงจร chopper เมื่อ load เป็น R

ในลักษณะเช่นเดียวกันค่ากระแส RMS (I_{RMS}) มีค่าเท่ากับ

$$I_{RMS} = \sqrt{K} I_{IN} \dots\dots\dots \text{amp} \text{ ----- (4)}$$

เนื่องจาก loss ในวงจร chopper มีค่าต่ำมาก ดังนั้นกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (P_o) ของวงจร chopper จะมี



รูปที่ 3.9 RMS voltage and current characteristic ของวงจร chopper เมื่อ load เป็น R

ค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าอินพุต (P_{IN}) ของวงจร chopper

$$P_{IN} = \frac{1}{T} \int_0^{KT} v_O i \, dt = \frac{1}{T} \int_0^{KT} \frac{v_o^2}{R} \, dt$$

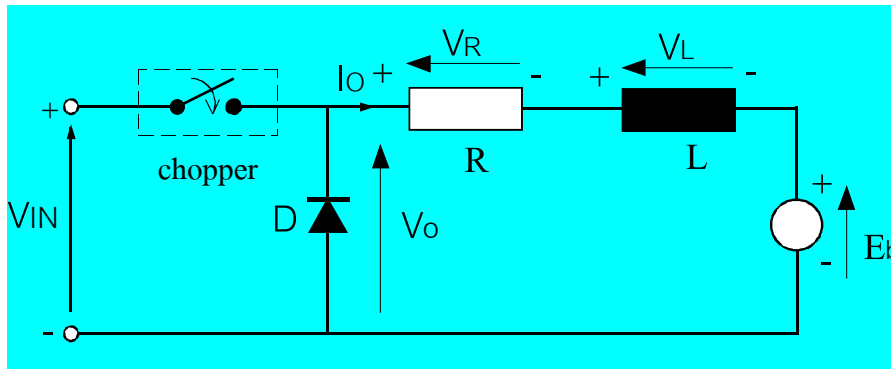
$$\therefore P_{IN} = \frac{K V_{IN}^2}{R} \dots\dots\dots \text{watt} \text{ ----- (5)}$$

และผลของค่าความต้านทานที่มีต่อวงจร (effective resistance) จะมีค่าเท่ากับ

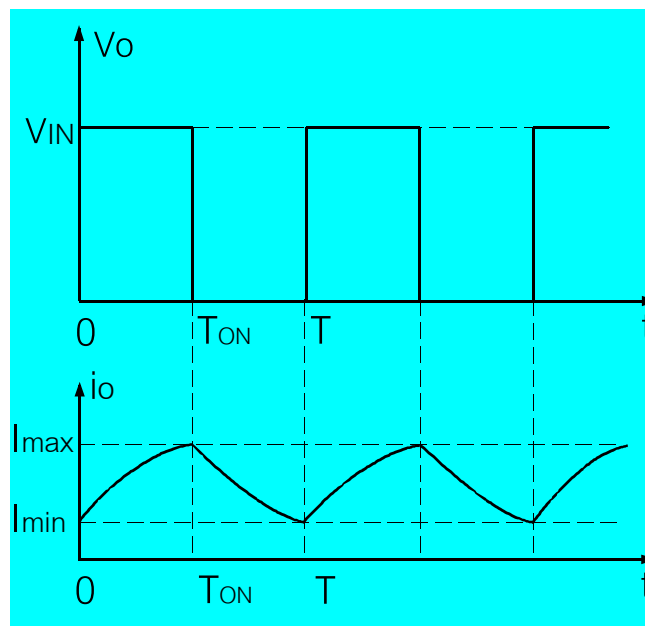
$$R_{eff} = \frac{R}{K} \text{ ----- (6)}$$

ค่า duty cycle (K) สามารถปรับได้จาก 0 ถึง 1 โดยการปรับ T_{ON} หรือ T จึงมีผลทำให้สามารถปรับค่าแรงดันเอาต์พุตจาก 0 volt ถึง V_{IN} โดยการปรับค่า K ทำให้สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าได้ตามต้องการ

3.3 Chopper with R-L load หลักการทำงานของวงจรเมื่อ load เป็น resistive และ inductive แสดงในรูปที่ 10 โดยที่การไหลของกระแสเอาต์พุตจะมีอยู่ 2 เงื่อนไขคือ เงื่อนไขที่กระแสเอาต์พุตไหลต่อเนื่องแสดงในรูปที่ 11 และเงื่อนไขที่กระแสเอาต์พุตไหลไม่ต่อเนื่องแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 3.10 Step Down Chopper กับ R-L load



รูปที่ 3.11 รูปคลื่นของกระแส i_o และ แรงดัน V_o ของวงจร R-L ในเงื่อนไขกระแส i_o ไหลต่อเนื่อง

ในสภาวะกระแสเอาต์พุตไหลต่อเนื่อง เมื่อ chopper สวิตช์ ON และค่าของ t อยู่ระหว่าง $0 < t < T_{ON}$

$$L \frac{di(t)}{dt} + R i(t) = V_{IN} - E_b \dots\dots\dots(5)$$

take Laplace

$$L S I(S) - L i(0^+) + R I(S) = \frac{V_{IN}(S) - E_b(S)}{S}$$

$$I(S) = \frac{V_{IN}(S) - E_b(S)}{L S (S + \frac{R}{L})} + \frac{i(0^+)}{(S + \frac{R}{L})}$$

invert Laplace

$$i(t) = \left(\frac{V_{IN} - E_b}{R} \right) \left[1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right] + I_{min} e^{-\frac{R}{L}t} \dots\dots\dots(6)$$

ขณะที่ chopper สวิตช์ ON จนกระทั่งเวลา t มีค่าเท่ากับ T_{ON} จะได้กระแส i(t) มีค่าเท่ากับ I_{max} และ จะมีสมการดังนี้ (เมื่อค่า $\tau = \frac{L}{R}$)

$$I_{max} = \left(\frac{V_{IN} - E_b}{R} \right) (1 - e^{-\frac{T_{ON}}{\tau}}) + I_{min} e^{-\frac{T_{ON}}{\tau}} \dots\dots\dots(7)$$

เมื่อ chopper สวิตช์ OFF และค่า t อยู่ระหว่าง $T_{ON} < t < T$ กระแส I_o จะไหลผ่าน free wheeling diode (D) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$L \frac{d i(t)}{d t} + R i(t) = -E_b \dots\dots\dots(8)$$

take laplace สมการที่ (8)

$$L S I(S) - L i(T_{ON}^+) + R I(S) = -\frac{E_b(S)}{S}$$

$$I(S) = -\frac{E_b}{L S (S + \frac{R}{L})} + \frac{i(T_{ON}^+)}{(S + \frac{R}{L})}$$

invert Laplace

$$i(t) = -\frac{E_b}{R} (1 - e^{-\frac{(t-T_{ON})}{\tau}}) + I_{max} e^{-\frac{(t-T_{ON})}{\tau}} \dots\dots\dots(9)$$

ขณะที่ chopper สวิตช์ OFF จนกระทั่งเวลา t มีค่าเท่ากับ T จะได้กระแส มีค่าเท่ากับ I_{min} และ จะมีสมการดังนี้

$$I_{min} = -\frac{E_b}{R} (1 - e^{-\frac{(T-T_{ON})}{\tau}}) + I_{max} e^{-\frac{(T-T_{ON})}{\tau}} \dots\dots\dots(10)$$

จากสมการที่ (7) และ (10) สามารถคำนวณหา I_{max} และ I_{min} ได้ดังสมการที่ (11) และ (12)

$$I_{\max} = \frac{V_{IN}}{R} \frac{(1 - e^{-T_{ON}/\tau})}{(1 - e^{-T/\tau})} - \frac{E_b}{R} \quad \text{----- (11)}$$

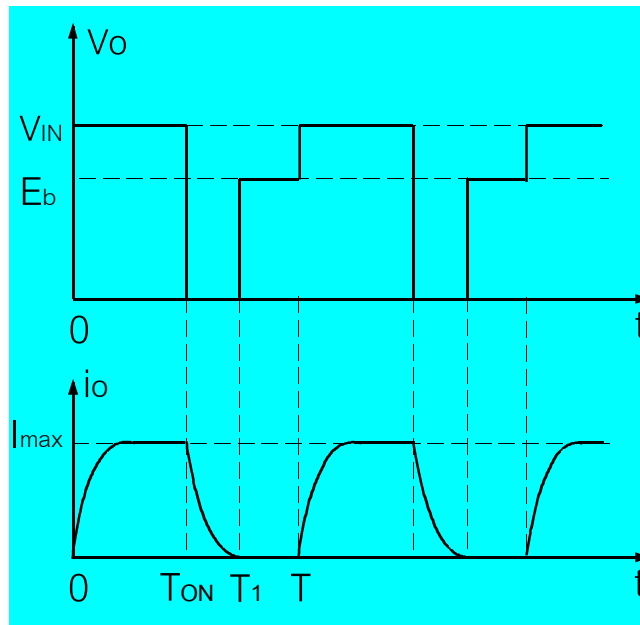
$$I_{\min} = \frac{V_{IN}}{R} \frac{(e^{T_{ON}/\tau} - 1)}{(e^{T/\tau} - 1)} - \frac{E_b}{R} \quad \text{----- (12)}$$

จากสมการที่ (11) และ (12) จะเห็นได้ว่าถ้า chopper สวิตช์เปิดกระแสอย่างต่อเนื่อง ($T_{ON} = T$) จะมีผลทำให้ได้ค่ากระแสดังนี้

$$I_{\max} = I_{\min} = \frac{V_{IN} - E_b}{R} \quad \text{----- (13)}$$

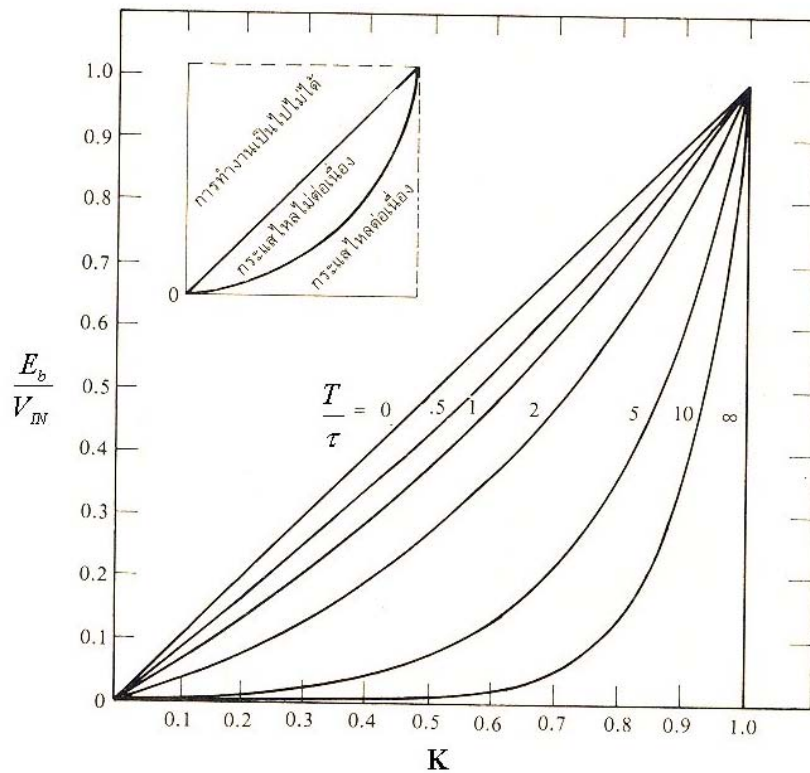
ถ้าลดค่าเวลา T_{ON} ให้มีค่าเท่ากับ T_{ON}^* ซึ่งเป็นค่าเวลา t ที่เป็นจุดเปลี่ยนจากกรณีที่มีกระแส I_o ไหลต่อเนื่อง เป็นกระแส I_o ไหลไม่ต่อเนื่อง มีผลทำให้ $I_{\min} = 0$ จากสมการที่ (12) สามารถหาเงื่อนไขที่ทำให้กระแสไหลไม่ต่อเนื่องได้ดังนี้

$$\frac{E_b}{V_{IN}} = \frac{(e^{KT/\tau} - 1)}{(e^{T/\tau} - 1)} \quad \text{----- (14)}$$



รูปที่ 3.12 รูปคลื่นกระแส I_o และแรงดัน V_o ของวงจร R-L ในเงื่อนไขกระแสไหลไม่ต่อเนื่อง

จากสมการที่ (14) สามารถนำมาเขียนเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{E_b}{R}$, $\frac{T}{\tau}$ และ K เพื่อแสดงเงื่อนไขการไหลของกระแส I_o



รูปที่ 3.13 แสดงเงื่อนไขขอบเขตระหว่างการทำงานกรรไกรกระแสไหลต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง

และในกรณีกระแสไหลไม่ต่อเนื่องจะมีผลทำให้กระแสที่ไหลในวงจรมีผลดังนี้

$$I_{\min} = 0 \text{amp} \text{ ----- (15)}$$

$$I_{\max} = \frac{V_{IN} - E_b}{R} \text{amp} \text{ ----- (16)}$$

สำหรับค่าแรงดันเฉลี่ยในกรณีกระแสไหลไม่ต่อเนื่องจะมีค่าเท่ากับ

$$V_{AV} = \frac{T_{ON}}{T} V_{IN} + \frac{(T - T_{ON}^*)}{T} E_b \text{ ----- (17)}$$

แต่ถ้า $T^* = T$ ซึ่งเป็นกรณีที่กระแสเริ่มไหลต่อเนื่องจะได้ค่าแรงดันเฉลี่ยดังนี้

$$V_{AV} = \frac{T_{ON}}{T} V_{IN}$$

ในการกำหนดขนาดของอิเล็กทรอนิกส์สวิตช์และ freewheel diode ปกติจะกำหนดด้วยค่ากระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่าน โดยที่ค่ากระแสเฉลี่ยสูงสุดที่ไหลผ่านอิเล็กทรอนิกส์สวิตช์จะเกิดขึ้นที่ $T_{ON} = T$ จะมีค่าเท่ากับ

$$I_{SW} = \frac{V_{IN} - E_b}{R} \text{ ----- (18)}$$

สำหรับการหาค่ากระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่าน freewheel diode เพื่อให้ง่ายจะคำนวณด้วยวิธีประมาณโดยสมมุติว่าค่า inductance มีขนาดใหญ่สามารถรักษากระแสให้คงที่ดังนั้นจะได้ค่ากระแส I_D ดังนี้

$$I_D = \frac{T - T_{ON}}{T} \frac{T_{ON}}{T} \frac{V_{IN} - E_b}{R}$$

$$I_D = (1 - K) K \frac{(V_{IN} - E_b)}{R} \quad \text{----- (19)}$$

จากสมการที่ 19 สามารถหาค่ากระแสเฉลี่ยสูงสุดผ่าน freewheel diode ได้ดังนี้

$$\frac{d}{dK} I_{DAV} = \frac{d}{dK} (1 - K) K \frac{(V_{IN} - E_b)}{R} = 0$$

$$= (1 - 2K) \frac{(V_{IN} - E_b)}{R} = 0$$

$$\therefore K = 0.5$$

นำค่า duty cycle เท่ากับ 0.5 แทนค่าในสมการที่ 19 จะได้ค่ากระแสเฉลี่ยไหลผ่าน freewheel diode สูงสุดดังนี้

$$I_{DAVMAX} = 0.25 \frac{(V_{IN} - E_b)}{R} \quad \text{----- (20)}$$