

Buck Converter

Presented by Byoung-Kuk Lee, Ph.D.

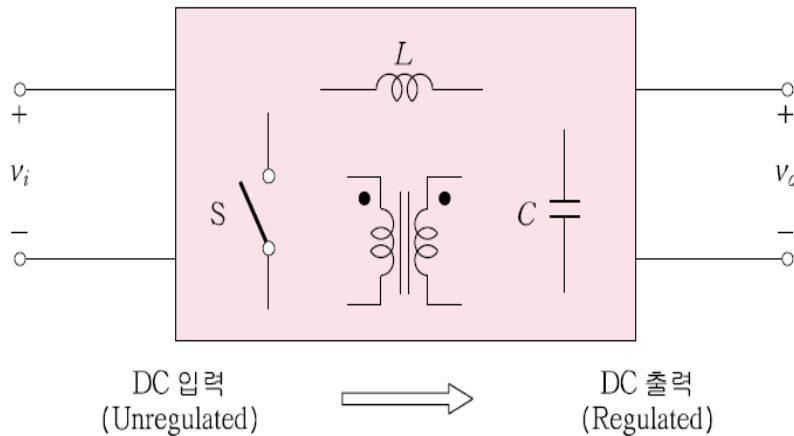
**Energy Mechatronics Lab.
College of Information and Communication Eng.
Sungkyunkwan University**

<http://seml.skku.ac.kr>



전력변환의 기본원리

DC-DC converter의 개념도



■ DC-DC Converter

- 임의의 DC 입력 전원을 부하가 요구하는 형태의 직류전원으로 변환시키는 전력변환기로 반도체 스위치, 커패시터, 인덕터 및 변압기로 구성

■ 반도체 스위치

- 입력에서 출력으로 전달되는 에너지를 제어

■ 인덕터, 커패시터

- 에너지를 전달하는 매개 역할을 하거나, 출력의 불필요한 리플 성분을 제거하기 위한 필터

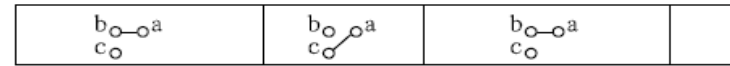
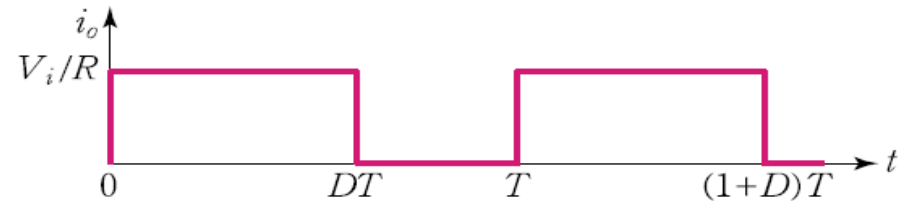
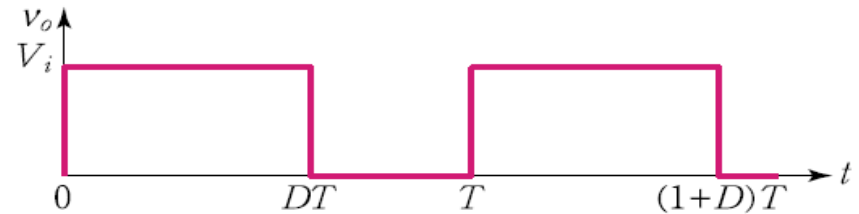
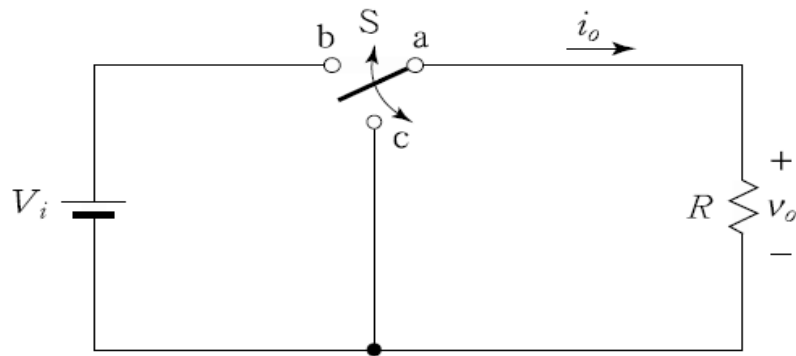
■ 변압기

- 출력의 전압 조절이나 전기적인 분리를 위해 사용



전력변환의 기본원리

간략한 형태의 DC-DC Converter



- 스위치가 접점 b or c에 접함에 따라 부하에 걸리는 전압과 부하전류의 크기 가변 가능
- 주기 T에 따라 b점에 접할 때의 시간(DT), c점에 접할 때의 시간((1-D)T)을 인가 시 펄스형태의 전압, 전류 획득 가능

출력전압 및 출력전력의 평균

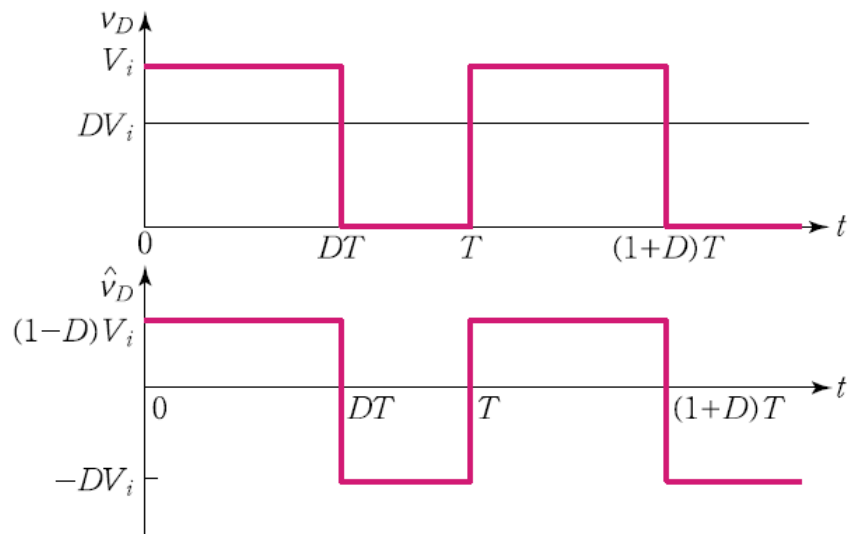
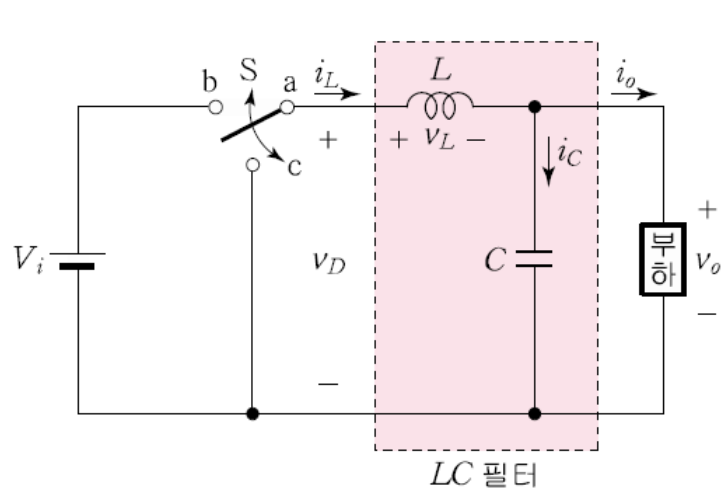
$$V_o = \frac{1}{T} \cdot [DT \cdot V_i + (1-D)T \cdot 0] = DV_i$$

$$P_o = \frac{1}{T} \cdot [DT \cdot \frac{V_i^2}{R} + (1-D)T \cdot 0] = D \frac{V_i^2}{R}$$



Buck converter의 동작원리

Buck converter의 기본회로 및 파형



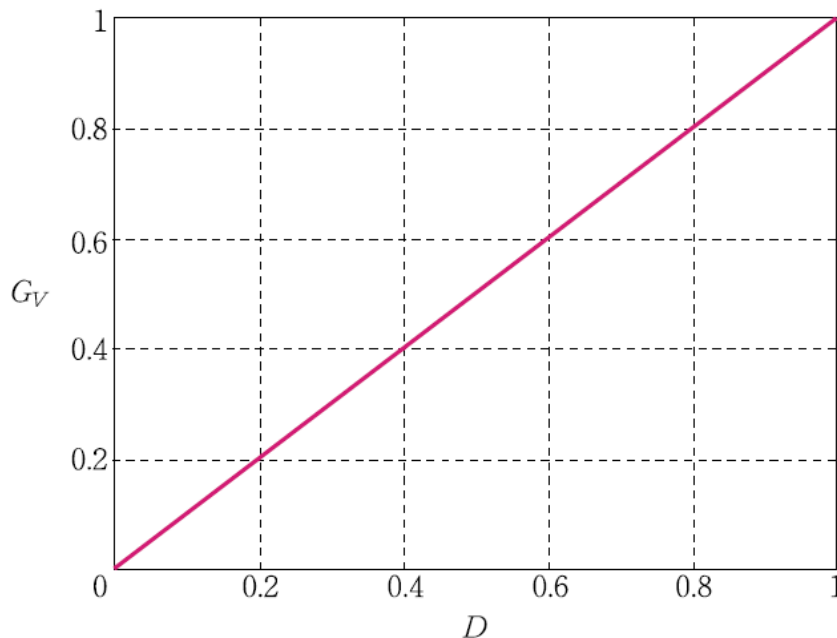
이상적 필터인 경우 교류성분 제거가능

$$G_v \equiv \frac{V_o}{V_i} = \frac{DV_i}{V_i}$$



Buck converter의 동작원리

Duty와 전압전달비의 관계



$$G_V \equiv \frac{V_o}{V_i} = \frac{DV_i}{V_i} = D$$

$$(0 < D < 1)$$

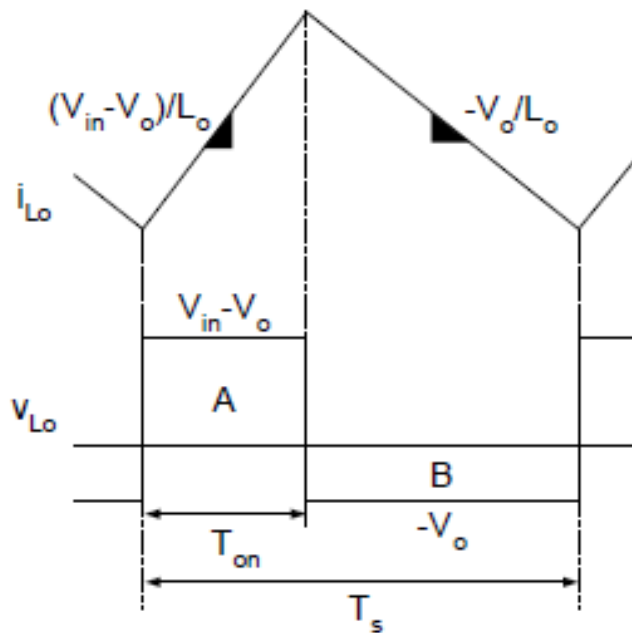
$$\frac{T_{ON}}{T} = D$$

- 이상적인 경우 Duty가 0~1사이로 가변함에 따라 입력 대비 출력전압은 정비례 관계로 증가 혹은 감소함
- 실제 환경에서는 인덕터의 기생 저항 성분, 스위치의 On 전압, 환류 다이오드의 순방향 전압 등 컨버터 회로 내의 기생 손실 요소에 의해 미소의 전압 강하 발생



CCM Buck converter

Voltage second balance



❖ 정상 상태 조건 (Buck Converter 기준)

- 인덕터 충전 에너지양 = 인덕터 방전 에너지양

$$\frac{V_{in} - V_o}{L_o} T_{on} = \frac{V_o}{L_o} (T_s - T_{on})$$

- 인덕터 평균 전압 = 0
- Area A = Area B

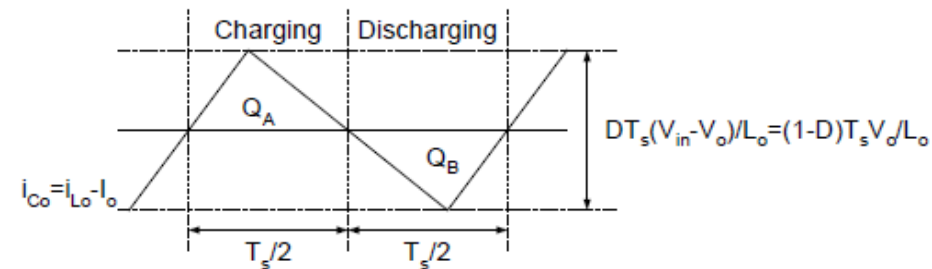
$$(V_{in} - V_o) T_{on} = V_o (T_s - T_{on})$$

$$\therefore V_o = D V_{in} \quad (D = \frac{T_{on}}{T_s})$$



CCM Buck converter

Ampere second balance



❖ 정상 상태 조건 (Buck Converter 기준)

- 커패시터 충전 전하량 = 커패시터 방전 전하량
- Area of Q_A (charging charge) = Area of Q_B (discharge charge)

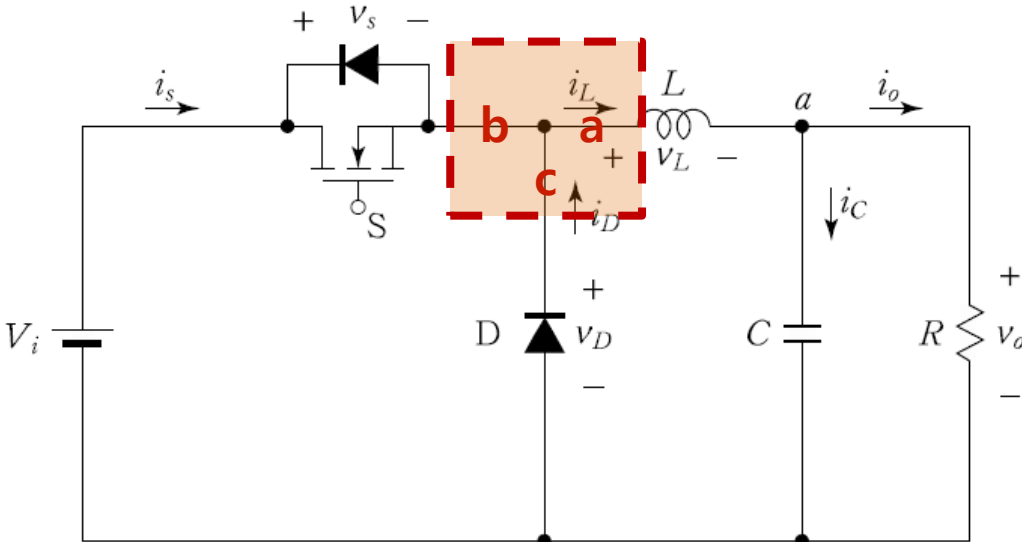
$$\frac{1}{2} \frac{(V_{in} - V_o)}{2L_o} DT_s \cdot \frac{T_s}{2} = \frac{1}{2} \frac{V_o}{2L_o} (1-D)T_s \cdot \frac{T_s}{2}$$

$$\therefore V_o = DV_{in}$$

- 커패시터 평균 전류 = 0



실제 Buck Converter의 구성

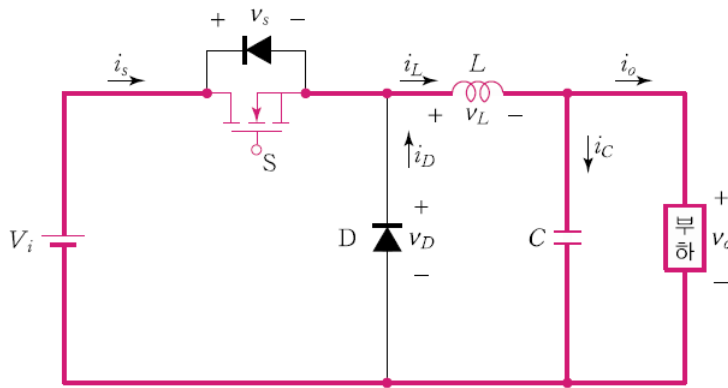


- 스위치 역할을 하는 MOSFET과 스위치 OFF시 인덕터의 전류 path를 형성하는 환류 다이오드로 a, b, c점을 구현

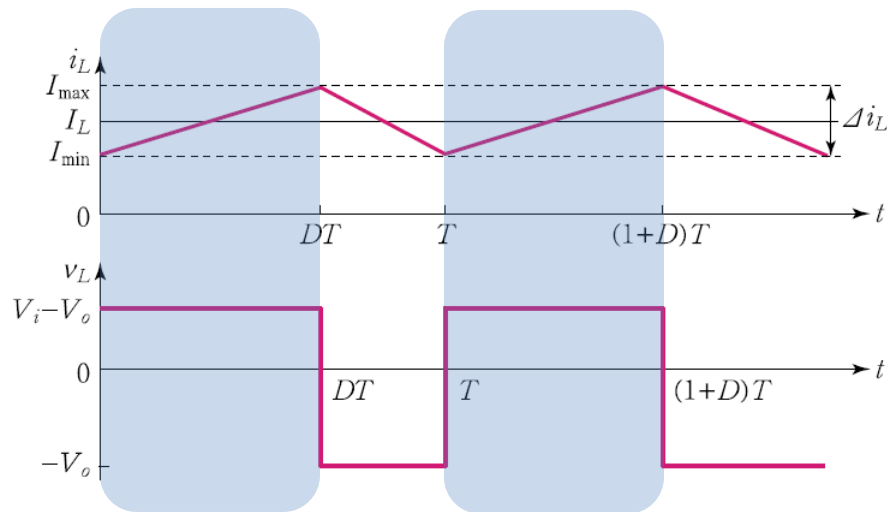


CCM Buck converter – 정상상태 해석

인덕터 전류 상승구간



(a) MOSFET S 온, 다이오드 D 오프



$$1) 0 \leq t < DT$$

$$v_L = V_i - V_o$$

$$v_L = L \frac{di_L}{dt}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_i - V_o}{L}$$

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int_0^t (V_i - v_o) dt + I_{\min}$$

$$\begin{aligned} i_L(DT) &= I_{\max} \\ &= \frac{1}{L} \int_0^{DT} (V_i - v_o) dt + I_{\min} \end{aligned}$$

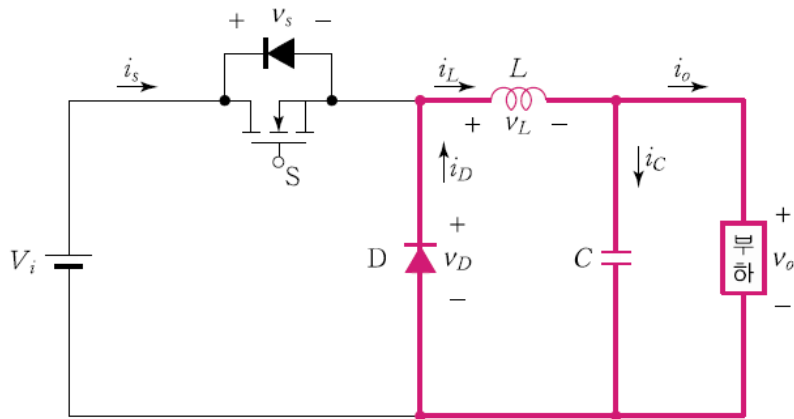
$$I_{\max} - I_{\min} = \frac{V_i - V_o}{L} \cdot DT$$

$$\therefore \Delta i_L = \frac{V_i - V_o}{L} \cdot DT$$

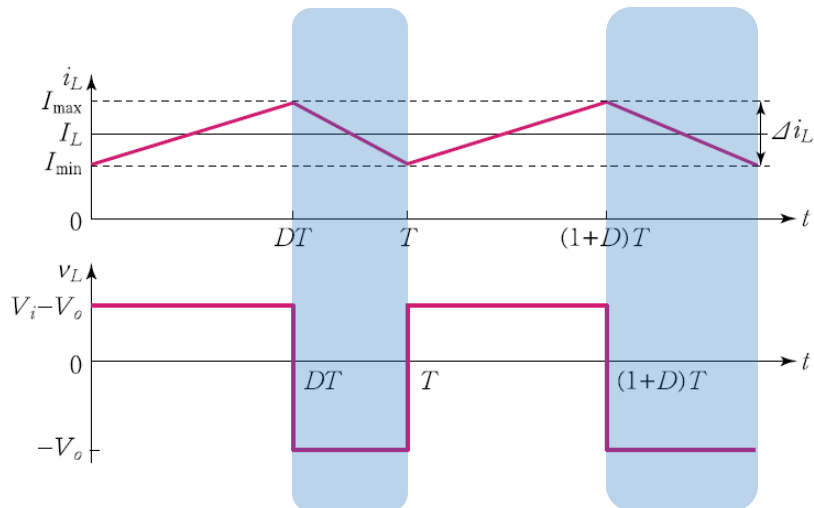


CCM Buck converter – 정상상태 해석

인덕터 전류 하강구간



(b) MOSFET S 오프, 다이오드 D 온



$$2) DT \leq t < T$$

$$v_L = -v_0$$

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{v_0}{L}$$

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int_{DT}^t (-v_0) dt + I_{\max}$$

$$i_L(t = T) = I_{\min}$$

$$= \frac{1}{L} \int_{DT}^T (-v_0) dt + I_{\max}$$

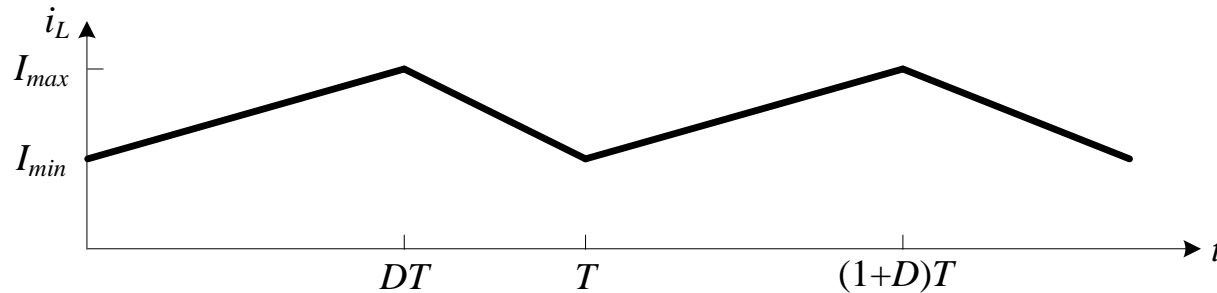
$$I_{\min} - I_{\max} = \frac{-V_0}{L} \cdot (1-D)T$$

$$\therefore \Delta i_L = \frac{V_o}{L} \cdot (1-D)T$$



CCM Buck converter – 정상상태 해석

인덕터 평균 & 최대, 최소 전류 값



평균값

$$I_L = \frac{I_{max} + I_{min}}{2} \quad I_L = I_O = \frac{V_O}{R}$$

$$i_L = i_C + i_O$$

- 정상상태에서 Capacitor의 평균전류값이 0 이 되므로 인덕터 전류의 평균값은 부하전류와 같다

최대값

$$\begin{aligned} I_{max} &= I_L + V_O \cdot \frac{1-D}{2L} \cdot T \\ &= I_O + V_i \cdot \frac{D(1-D)}{2L} \cdot T \end{aligned}$$

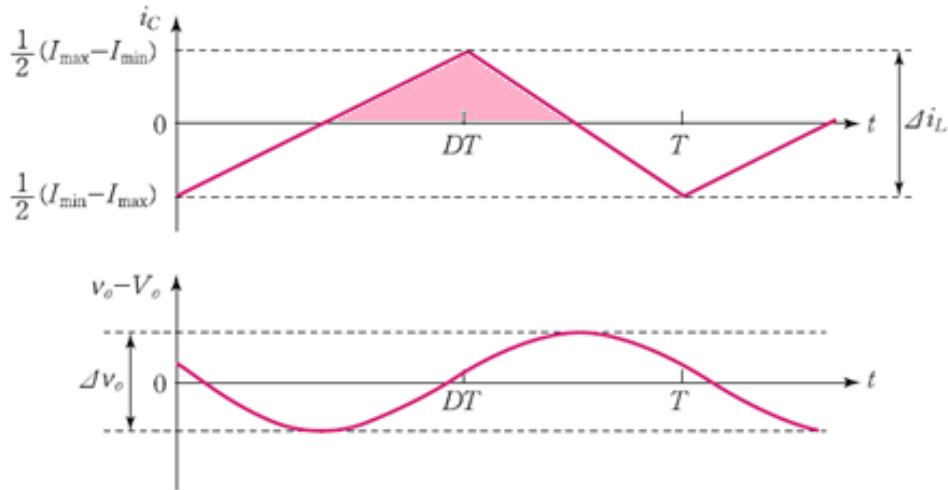
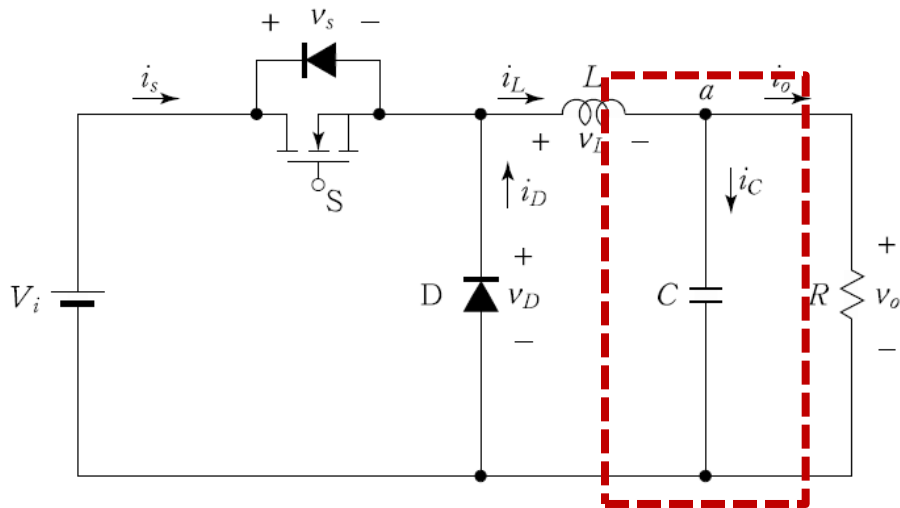
최소값

$$\begin{aligned} I_{min} &= I_L - V_O \cdot \frac{1-D}{2L} \cdot T \\ &= I_O - V_i \cdot \frac{D(1-D)}{2L} \cdot T \end{aligned}$$



CCM Buck converter – 정상상태 해석

출력전압의 Ripple



$$i_C = C \frac{dv_o}{dt}$$

$$\Delta v_o = \frac{1}{C} \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta i_L}{2} \right) \cdot \frac{T}{2}$$

$$= \frac{1}{C} (\Delta i_L) \cdot \frac{T}{8}$$

$$(\Delta i_L = I_{MAX} - I_{MIN})$$

$$\Delta v_o = \frac{1}{LC} \frac{V_i (1-D) \cdot D \cdot T^2}{8}$$

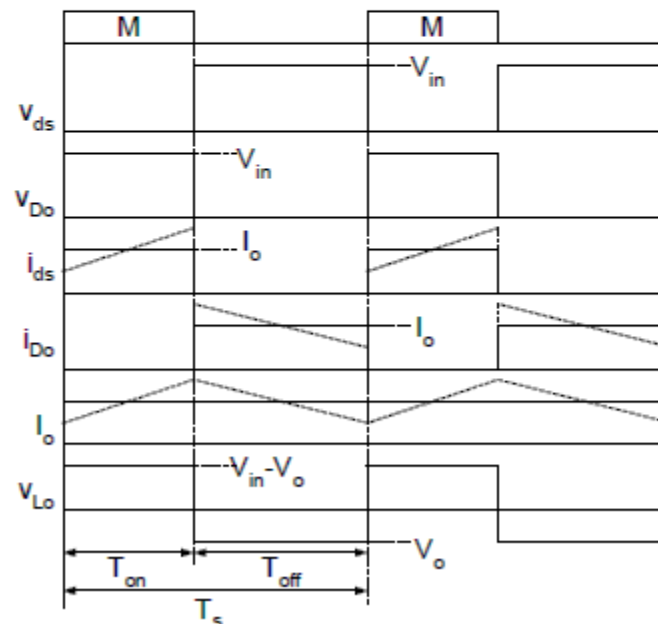
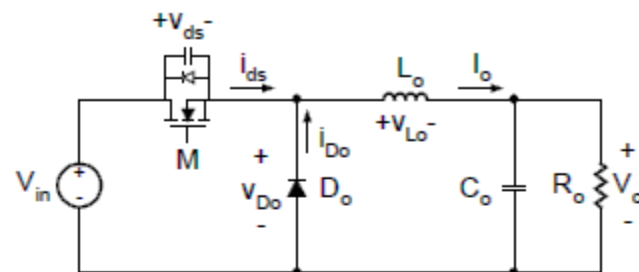


Buck converter – 시뮬레이션

CCM

	Voltage stress	Current stress
switch M	V_{in}	$I_o + \frac{1}{2}I_{o_ripple} = \frac{V_o}{R_o} + \frac{V_o}{2L_o}(1-D)T_s$
diode D_o	V_{in}	$I_o + \frac{1}{2}I_{o_ripple} = \frac{V_o}{R_o} + \frac{V_o}{2L_o}(1-D)T_s$

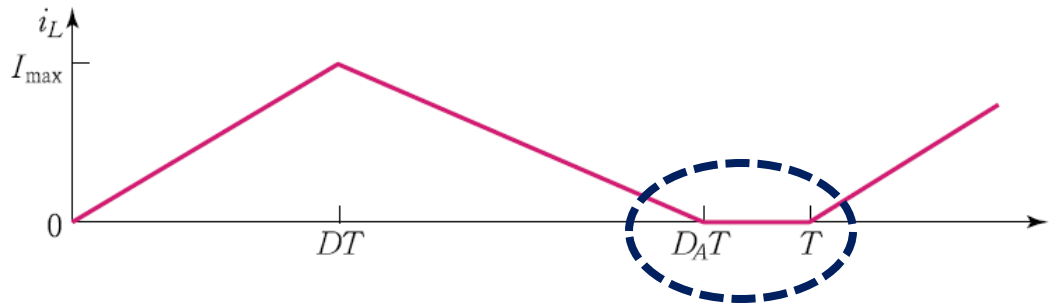
	Average Current	RMS Current
switch M	DI_o	?
diode D_o	$(1-D)I_o$?
inductor L_o	I_o	?
capacitor C_o	0	?





DCM Buck converter – 정상상태 해석

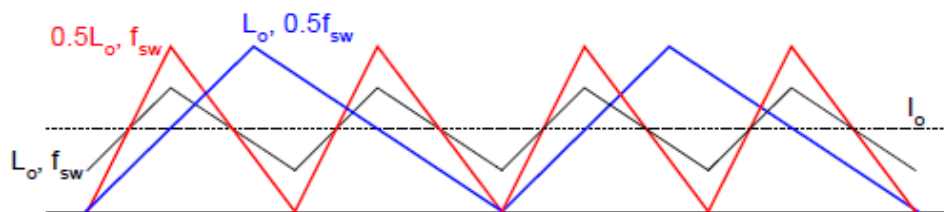
전류 불연속 모드 조건



DCM 조건이 되기 위해서는 인덕터 전류의 최소값이 0보다 작아야 함

$$I_{\min} = I_L - V_o \cdot \frac{1-D}{2L} \cdot T = I_o - V_i \cdot \frac{D(1-D)}{2L} \cdot T < 0$$

- 스위치 On 상태 : DT 구간 동안 선형적으로 전류 상승
- 스위치 Off 상태 : $(1-D)T$ 구간 동안 다이오드는 On 상태를 유지하여 인덕터 전류는 선형적으로 하강
- $(1-D)T$ 구간 중 $D_A T$ 이후부터 스위치가 On 되는 시점까지 인덕터 전류가 0이 되면, 다이오드는 Off 상태를 유지

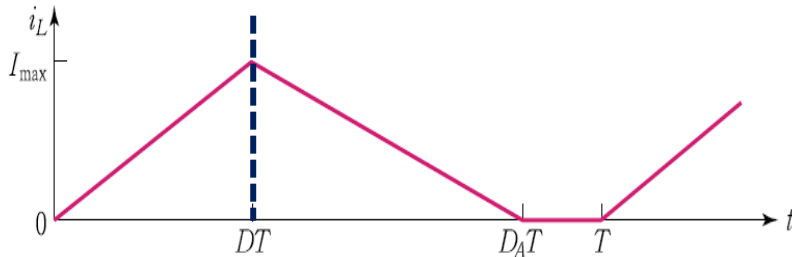


- Load current : I_O
 - CCM에서 부하 전류 감소 시, DCM으로 모드 변환 가능
- Inductance : L_O
 - CCM 기준 대비 Inductance 감소시, 기울기 상승으로 인해 DCM으로 변환 가능
- Frequency : f_{sw}
 - 주파수 감소 시, CCM 기준 대비 전류 리플 증가로 인해 DCM으로 변환 가능



DCM Buck converter – 정상상태 해석

변화된 입·출력 전압비



$$(1) 0 \leq t \leq DT$$

$$di = \frac{V_i - V_o}{L} \cdot dt$$

$$I_{\max} = \frac{V_i - V_o}{L} \cdot DT$$

$$(2) DT \leq t \leq D_A T$$

$$i(t) = I_{\max} - \frac{V_o}{L}(t - DT)$$

$$(3) D_A T \leq t \leq T$$

$$i = 0$$

$$0 = I_{\max} - \frac{V_o}{L}(D_A T - DT) \text{ 에서}$$

$$D_A = D + \frac{L \cdot I_{\max}}{V_o T}$$

에너지보존의 법칙에 의해

$$E_{in} = V_i \cdot \frac{I_{\max}}{2} \cdot DT$$

$$E_o = V_o \cdot \frac{I_{\max}}{2} \cdot D_A T$$

$$E_{in} = E_o$$

$$G_V \equiv \frac{V_o}{V_i} = \frac{D}{D_A}$$

$$i_L(t = D_A T) = -\frac{V_o}{L} \cdot (D_A T - DT) + I_{\max} = 0$$

$$D_A = D + \frac{LI_{\max}}{TV_o}$$

$$I_o = \frac{I_{\max}}{2} \cdot D_A$$

$$D_A = D + \frac{2LI_o}{D_A TV_o} = D + \frac{2LI_o}{DTV_i}$$

$$G_V = \frac{D}{D + \frac{2LI_o}{DTV_i}}$$

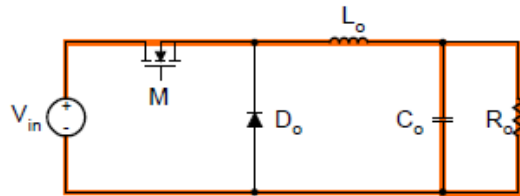


Buck converter – 시뮬레이션

DCM

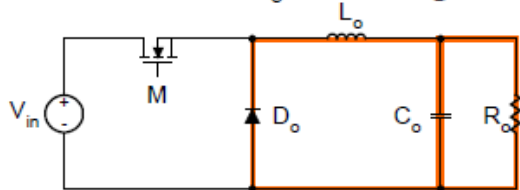
– Mode 1 (during DT_s) powering

- Switch on, D_o blocking



– Mode 2 (during T_{off_1}) freewheeling

- Switch off, D_o conducting



– Mode 3 (during T_{off_2}) discharging

- Switch off, D_o off

