

REPORT

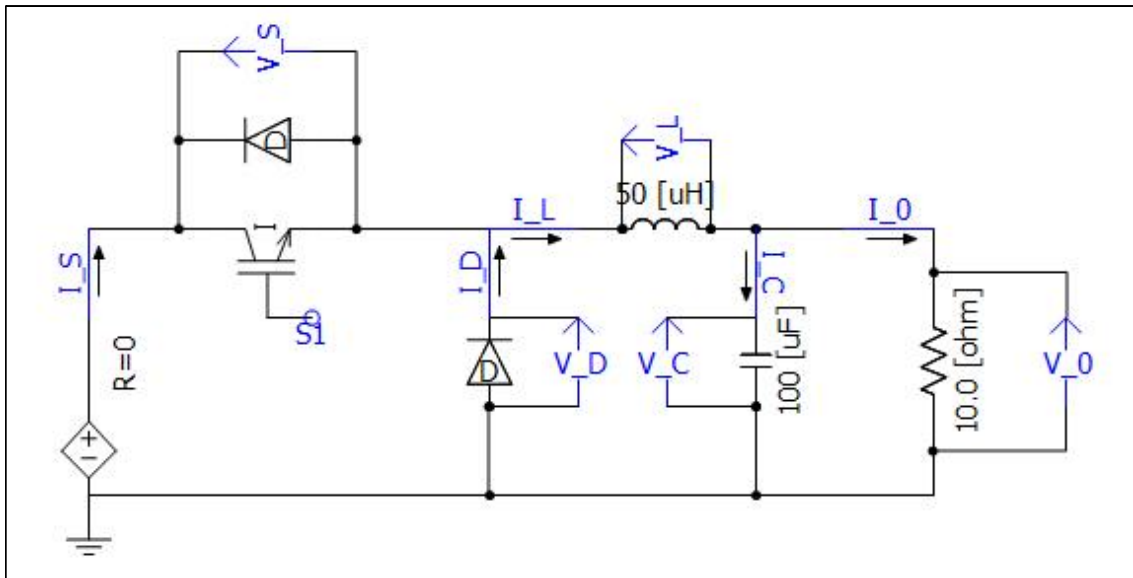
PSCAD 설계 보고서3



과목명	전력변환디바이스
담당교수	심재웅 교수님
학과	융합전자공학과
학년	3학년
학번	201910906
이름	이학민
제출일	2023.10.14.

1. Buck Converter

1) 회로도

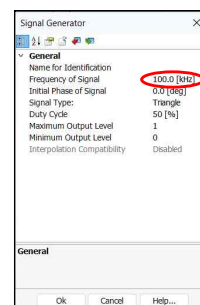
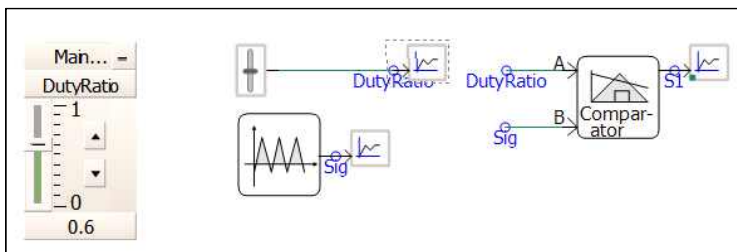


PSCAD로 설계한 Buck Converter 회로

2) 시뮬레이션 환경 설정

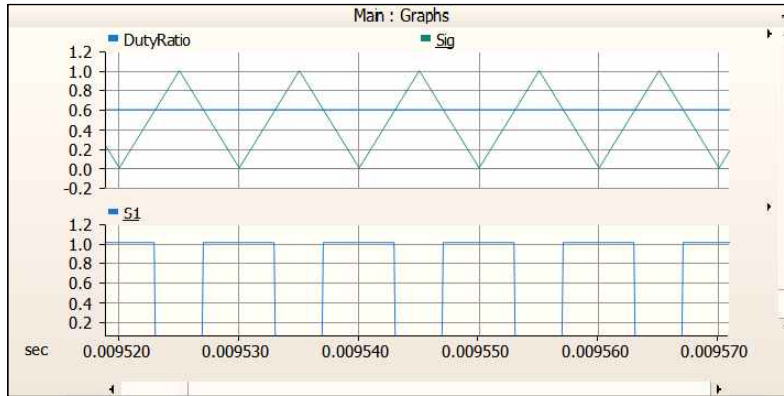
Duration of Run (s)	0.1
Solution Time Step (us)	0.1
Channel Plot Step (us)	0.1
Runtime	

시뮬레이션 실행 시 Runtime은 각각 0.1로 설정하였다. 가장 최적화된 결과를 볼 수 있도록 Solution Time Step과 Channel Plot Step을 같은 값으로 일치시켰다.



문제에서 주어진대로 듀티비는 0.6, Signal Generator의 주파수는 100[kHz]로 설정하였다.

3) PSCAD 시뮬레이션 결과



입력으로 사용하는 신호의 그래프는 다음과 같다. DutyRatio > Sig일 때 S1이 1의 값을 가지고 이외의 경우 0이다.

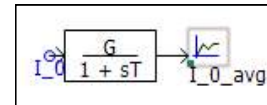
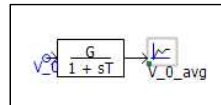
① 예제 5-2

(a) 평균 출력전압 V_o 와 평균 부하전류 I_o

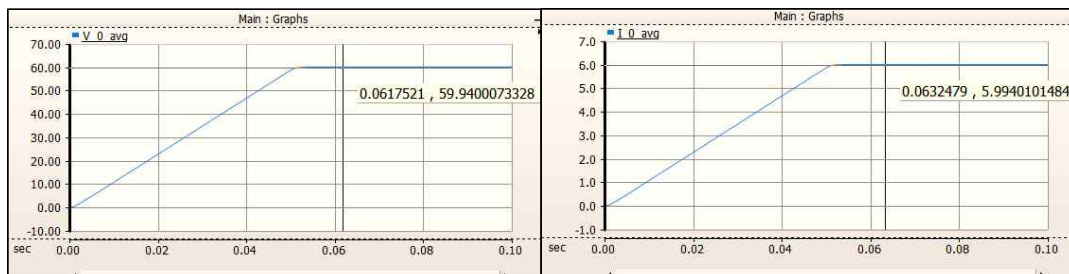
Buck Converter의 정상상태 해석에 따라 풀이하여 값을 구하면 다음과 같다.

$$V_o = DV_i = 0.6 \times 100 = 60 \text{ V}$$

$$I_L = I_o = \frac{V_o}{R} = \frac{60}{10} = 6 \text{ A}$$



파형의 평균값을 구하기 위해 Time Constant가 0.001[s]인 Low Pass Filter를 사용하였다. Low Pass Filter를 거치면 출력에는 고주파 성분이 사라지고 직류 성분만 남기 때문에 평균값을 구할 수 있다.



시뮬레이션하여 얻은 그래프로부터 읽은 값은 $V_o = 59.9400073328 \text{ [V]}$,
 $I_o = 5.99401014842 \text{ [A]}$ 이다.

(b) 인덕터에 흐르는 전류의 평균값, 최대값과 최소값

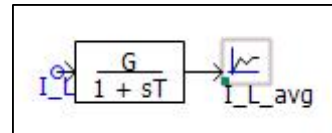
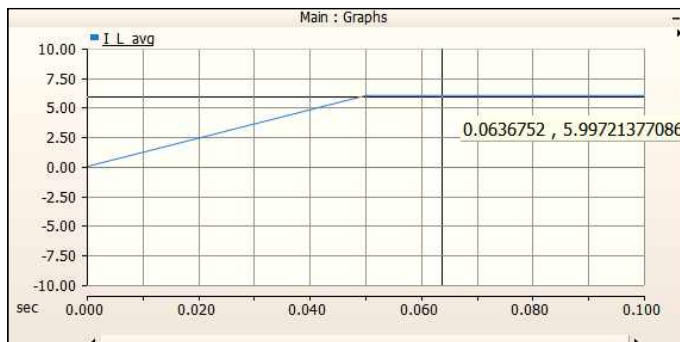
인덕터에 흐르는 전류의 평균값과 최대, 최소값을 구하는 과정은 다음과 같다.

$$I_L = I_o = \frac{V_o}{R} = \frac{60}{10} = 6 \text{ A}$$

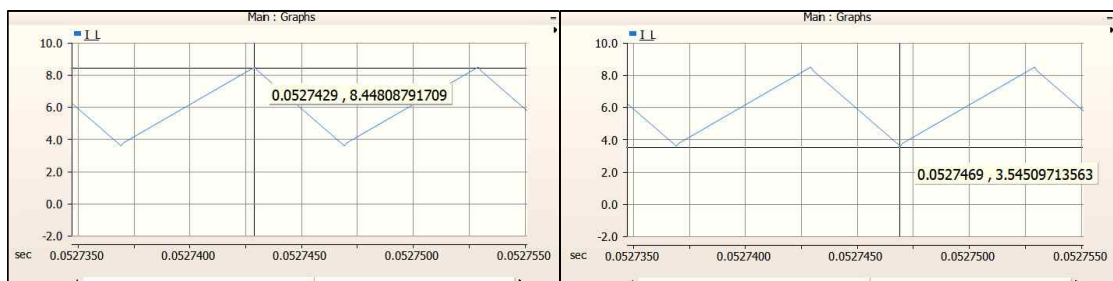
$$\begin{aligned} I_{\max} &= I_L + V_i \cdot \frac{1-D}{2L} \cdot DT \\ &= 6 + 100 \times \frac{1-0.6}{2 \times 50 \times 10^{-6}} \times 0.6 \times 10^{-5} = 6 + 2.4 = 8.4 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{\min} &= I_L - V_i \cdot \frac{1-D}{2L} \cdot DT \\ &= 6 - 100 \times \frac{1-0.6}{2 \times 50 \times 10^{-6}} \times 0.6 \times 10^{-5} = 6 - 2.4 = 3.6 \text{ A} \end{aligned}$$

한편, 시뮬레이션하여 얻은 그래프의 결과는 다음과 같다.



위 그래프로부터, $I_L = 5.99721377086 \text{ [A]}$ 이다.



위 그래프로부터 $I_{\max} = 8.44808791709 \text{ [A]}$, $I_{\min} = 3.54509713563 \text{ [A]}$ 이다.

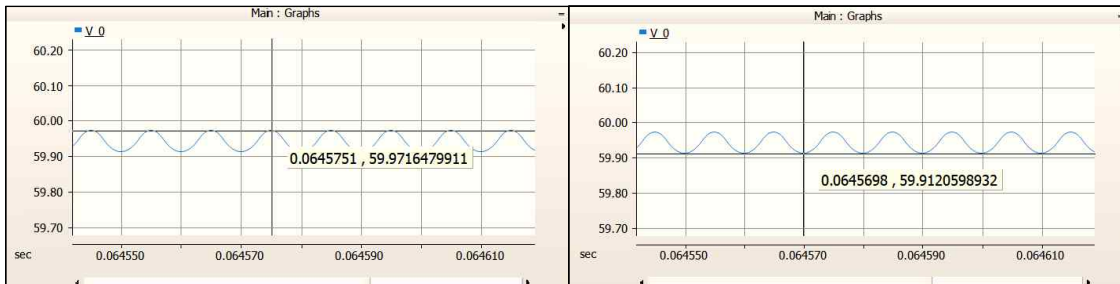
(c) 출력전압 변동값 Δv_0

출력전압 변동값 Δv_0 를 구하는 과정은 다음과 같다.

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

$$= \frac{1}{100 \times 10^{-6}} \times (8.4 - 3.6) \times \frac{10^{-5}}{8} = \frac{4.8}{80} = 0.06 \text{ V}$$

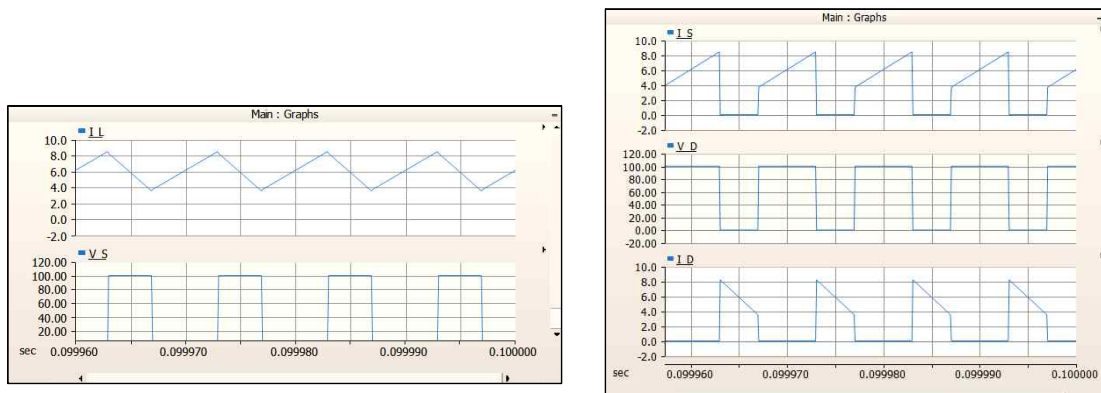
V_0 그래프를 확대하여 정상상태에서 일정하게 출력되는 모습을 관측하였다.



위 그래프로부터 $\Delta v_0 = 59.9716479911 - 59.9120598932 = 0.0595880979 \text{ [V]}$ 이다.

② 예제 5-3

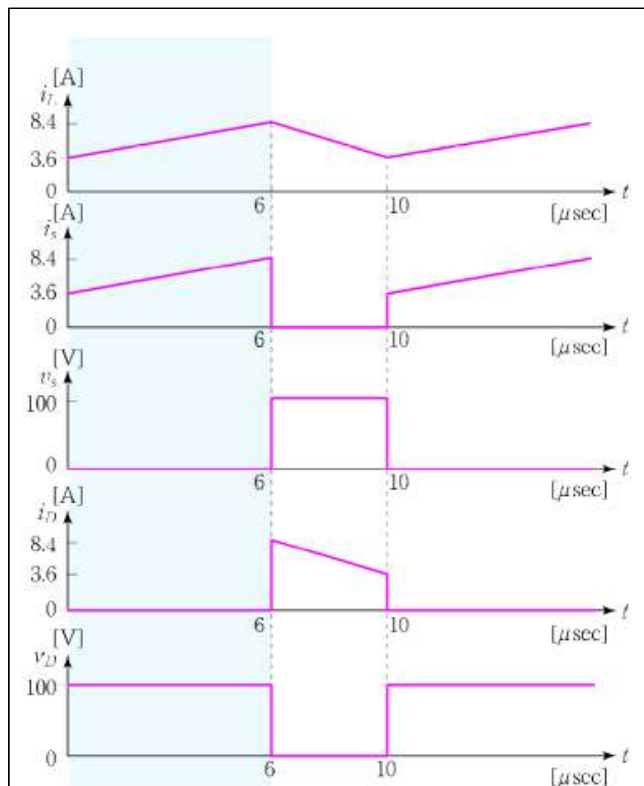
시뮬레이션을 통하여 인덕터 전류 i_L , MOSFET S의 전압 v_s , 전류 i_s 다이오드 D의 전압 v_D , 전류 i_D 의 파형을 그리면 다음과 같은 그래프를 얻을 수 있다.



4) 결과 분석 및 결론

Buck Converter			
구분	이론	실제	오차율
V ₀	60	59.9400073328	0.100%
I ₀	6	5.99401014842	0.100%
I _L	6	5.99721377086	0.046%
I _{max}	8.4	8.44808791709	0.572%
I _{min}	3.6	3.54509713563	1.525%
Δv_0	0.06	0.0595880979	0.687%

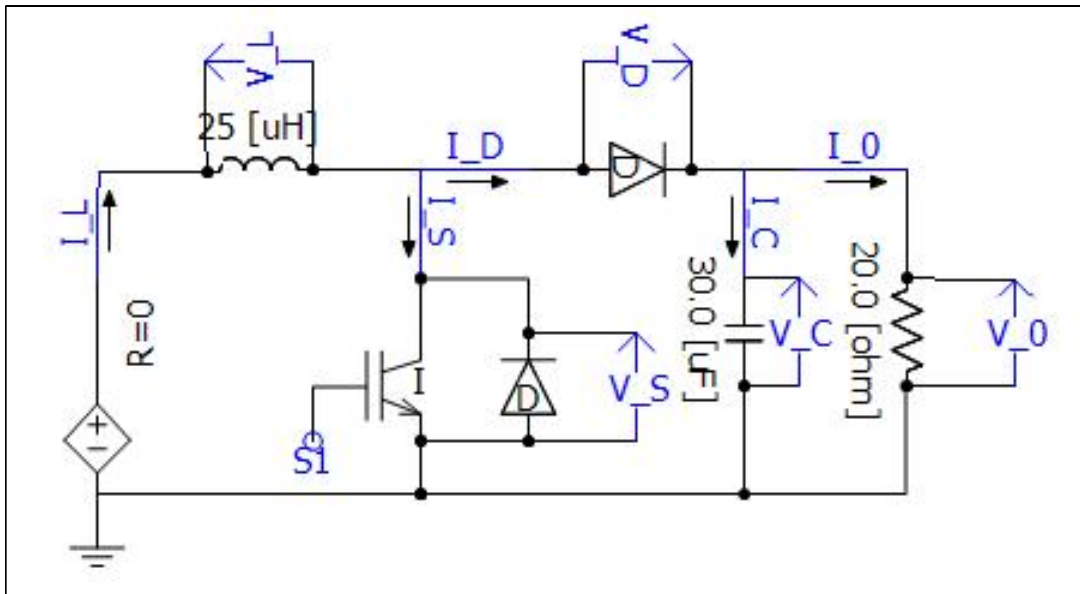
예제 5-2를 시뮬레이션한 결과의 오차율을 엑셀로 계산한 결과, 오차율이 0.05~1.5% 내외로 정확한 데이터를 얻었음을 확인하였다.



예제 5-3에서 주어진 다음과 같은 각각의 파형이 시뮬레이션을 통해 얻은 그래프와 일치함을 알 수 있다.

2. Boost Converter

1) 회로도

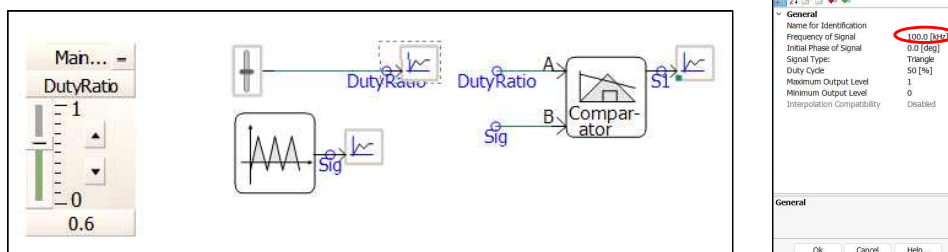


PSCAD로 설계한 Boost Converter 회로

2) 시뮬레이션 환경 설정

Duration of Run (s)	0.1
Solution Time Step (us)	0.1
Channel Plot Step (us)	0.1
Runtime	

시뮬레이션 실행 시 Runtime은 각각 0.1로 설정하였다. 가장 최적화된 결과를 볼 수 있도록 Solution Time Step과 Channel Plot Step을 같은 값으로 일치시켰다.



문제에서 주어진 조건에 따라 계산하면 듀티비는 0.6이고, Signal Generator의 주파수는 스위칭 주기 $T=10[\mu\text{sec}]$ 의 역수인 $100[\text{kHz}]$ 로 설정하였다.

캐패시터 C는 출력 전압의 리플 성분 Δv_o 를 무시할 수 있을 정도로 크다고 가정하는데, Δv_o 가 1[V] 이하로 설계되는 값인 $30[\mu F]$ 로 설정하였다.

Δv_o 수식 정리 (C 계산위해 필요)

$$\begin{aligned}\Delta v_o &= \frac{1}{C} \cdot DT \cdot I_o \\ &= \frac{1}{C} \cdot DT \cdot (V_o / R)\end{aligned}$$

C 계산

$$C = \frac{V_o \cdot DT}{R \cdot \Delta v_o} \geq \frac{100 \times 0.6 \times (10 \times 10^{-6})}{20 \times 1} = 30 \mu F$$

$$C \geq 30 \mu F$$

또한 저항 R_0 는 $R_0 = \frac{V_o^2}{P_0} = \frac{100^2}{500} = 20 [\Omega]$ 으로 설정하였다.

3) PSCAD 시뮬레이션 결과

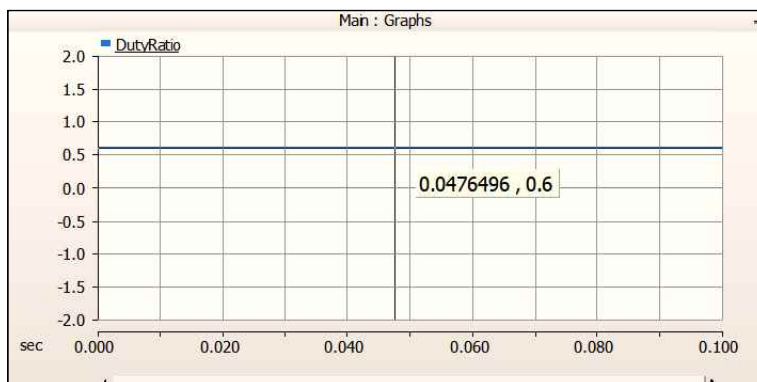
① 예제 5-7

(a) 듀티비 D

주어진 Boost Converter의 듀티비를 구하는 과정은 다음과 같다.

Duty Ratio

$$D = 1 - \frac{V_i}{V_o} = 0.6$$

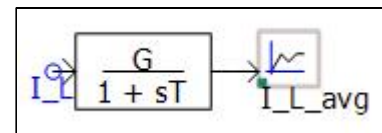
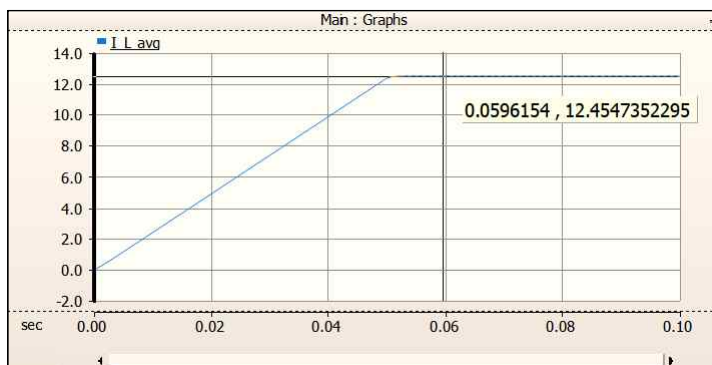


따라서 DutyRatio를 0.6으로 설정하여 시뮬레이션을 진행하였다.

(b) 인덕터의 평균전류 I_L

인덕터의 평균전류를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &\text{인덕터의 평균전류 } I_L \\ &P_{in} = V_i \cdot I_L \\ &I_L = \frac{P_{in}}{V_i} = \frac{500}{40} = 12.5 A \end{aligned}$$

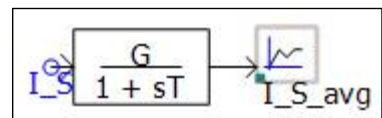
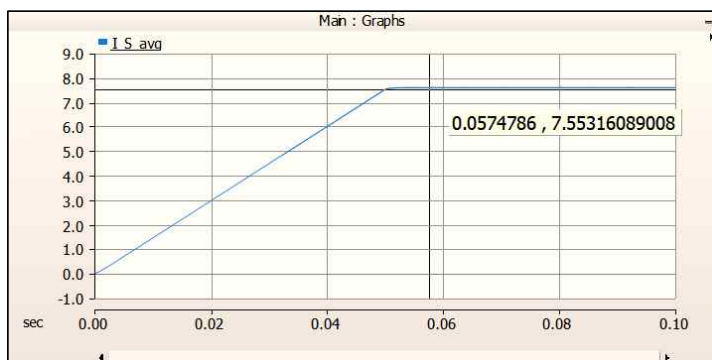


위 그래프로부터 $I_L = 12.4547352295 [A]$ 이다.

(c) 스위치 S의 평균전류 I_S

스위치 S의 평균전류를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &\text{스위치 S의 평균전류 } I_S \\ &I_S = I_L \cdot \frac{DT}{T} = DI_L = 0.6 \times 12.5 = 7.5 A \end{aligned}$$



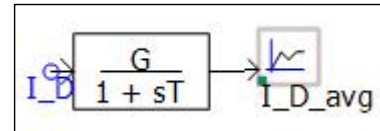
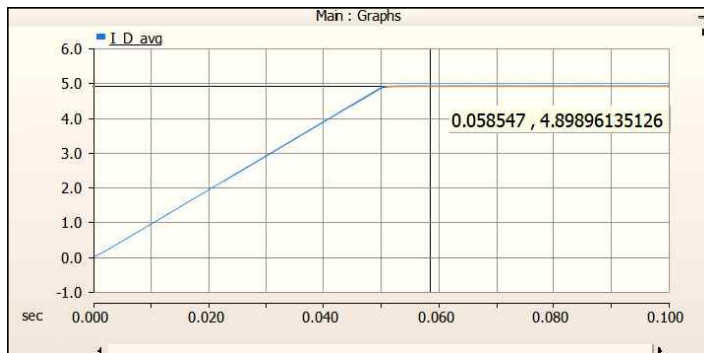
위 그래프로부터 $I_S = 7.55316089008 [A]$ 이다.

(d) 다이오드 D의 평균전류 I_D

다이오드 D의 평균전류를 구하면 다음과 같다.

다이오드 D의 평균전류 I_D

$$I_D = I_L \cdot \frac{(1-D)T}{T} = (1-D)I_L = 0.4 \times 12.5 = 5A$$



위 그래프로부터 $I_D = 4.89896135126 [A]$ 이다.

(e) 인덕터의 최대전류 I_{\max} 와 최소전류 I_{\min}

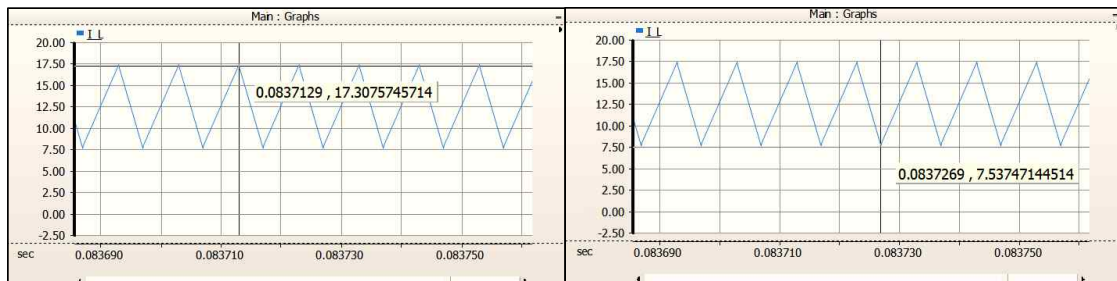
인덕터의 최대전류와 최소전류를 구하면 다음과 같다.

인덕터의 최대전류 I_{\max} 와 최소전류 I_{\min}

- 변위전류 $\Delta i_L = \frac{V_L}{L} \cdot DT$

$$I_{\max} = I_L + \frac{1}{2} \Delta i_L = I_L + \frac{V_L}{2L} \cdot DT = 12.5 + \frac{40}{2 \times (25 \times 10^{-6})} \times 0.6 \times (10 \times 10^{-6}) = 17.3A$$

$$I_{\min} = I_L - \frac{1}{2} \Delta i_L = I_L - \frac{V_L}{2L} \cdot DT = 12.5 - \frac{40}{2 \times (25 \times 10^{-6})} \times 0.6 \times (10 \times 10^{-6}) = 7.7A$$



위 그래프로부터 $I_{\max} = 17.3075745714 [A]$, $I_{\min} = 7.53747144514 [A]$ 이다.

② 예제 5-8

(a) 캐패시턴스 C 는 얼마로 설계되어야 하는가?

출력전압의 리플성분 Δv_o 를 1[V] 이하로 설계하기 위한 캐패시턴스 C 의 조건을 계산하면 다음과 같다.

캐패시턴스 C 는 얼마로 설계 되어야 하는가?

- Δv_o 수식 정리 (C 계산위해 필요)

$$\Delta v_o = \frac{1}{C} \cdot DT \cdot I_o$$

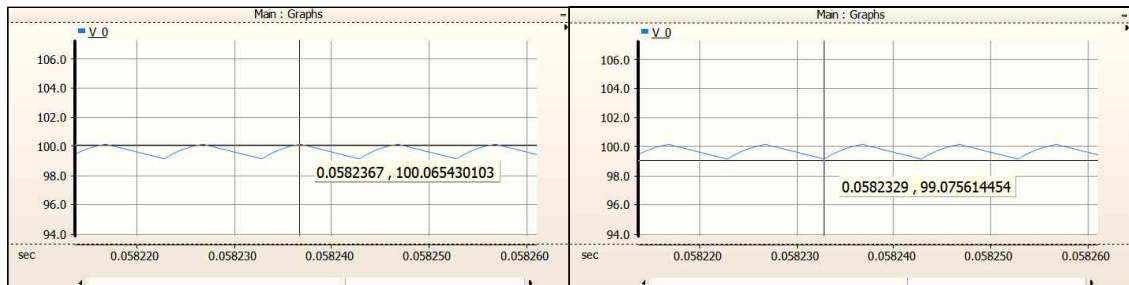
$$= \frac{1}{C} \cdot DT \cdot (V_o / R)$$

- C 계산

$$C = \frac{V_o \cdot DT}{R \cdot \Delta v_o} \geq \frac{100 \times 0.6 \times (10 \times 10^{-6})}{20 \times 1} = 30 \mu F$$

$$C \geq 30 \mu F$$

따라서 캐패시턴스 값을 $30[\mu F]$ 로 설정하고 출력전압의 파형을 분석하면 다음과 같다.



그래프로부터 $\Delta v_o = v_{o\max} - v_{o\min} = 100.065430103 - 99.075614454 = 0.989815649 [V]$ 이므로 Δv_o 가 1V 이하의 값을 가짐을 확인하였다.

(b) 스위치의 스위칭 주기 T 가 $50[\mu sec]$ 로 변동하면 캐패시턴스는 얼마로 변동하는가?

스위칭 주기 $T = 50 \mu sec$ 으로 변동하면 캐패시턴스 C 는 얼마로 설계 되어야 하는가?

C 계산

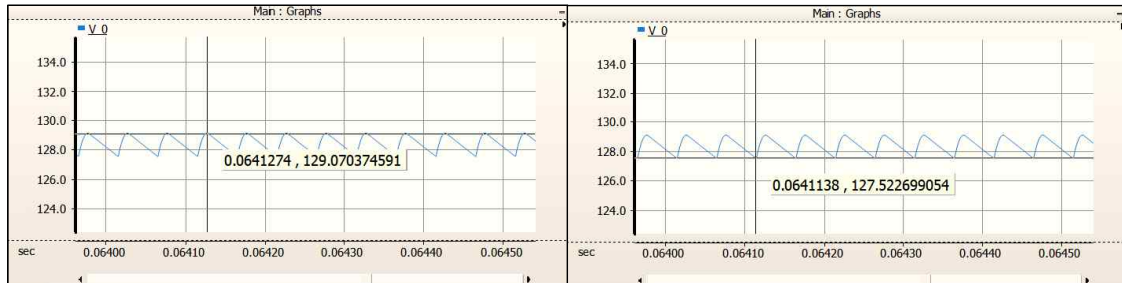
$$T = 10 \mu sec \rightarrow 50 \mu sec$$

$$C = \frac{V_o \cdot DT}{R \cdot \Delta v_o} \geq \frac{100 \times 0.6 \times (50 \times 10^{-6})}{20 \times 1} = 150 \mu F$$

$$C \geq 150 \mu F$$

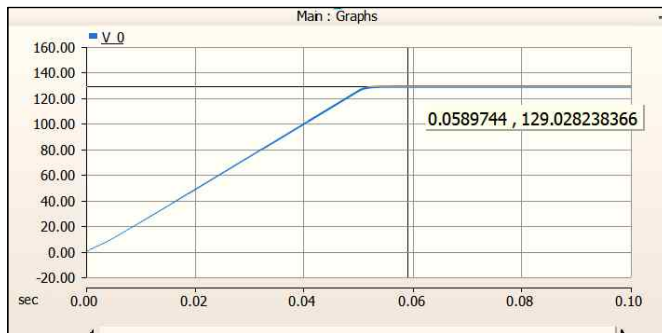
따라서 스위칭 주파수 f 를 $\frac{1}{T} = \frac{1}{50 \times 10^{-6}} = 20 [kHz]$ 로, 캐패시턴스 값을 $150[\mu F]$ 로 수정하여 시뮬레이션을 진행하였다.

위의 조건에서 시뮬레이션한 결과, v_0 의 파형과 최대 및 최소값은 다음과 같다.

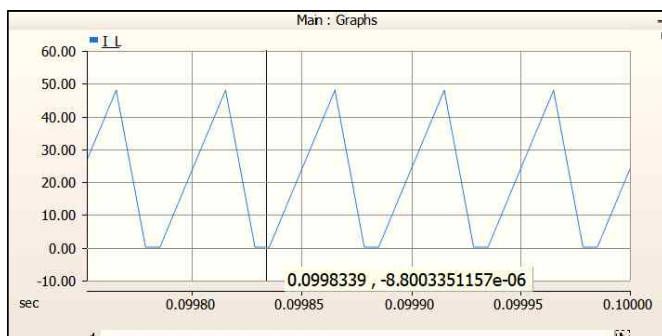


그래프로부터 $\Delta v_0 = v_{0\max} - v_{0\min} = 129.070374591 - 127.522699054 = 1.547675537$ [V]임을 얻었다.

따라서 실제 시뮬레이션을 통해 확인해보니 $\Delta v_0 \leq 1$ [V]의 조건이 만족하지 않았다. 무엇이 잘못되어 이런 현상이 나타났는지 분석해보았다.



우선 듀티비 0.6과 입력전압 40[V]의 조건에 따라 출력전압이 100[V]가 되어야 하는데, 약 129[V]가 나왔으므로 컨버터가 의도한 대로 동작하지 않았음을 알게 되었다.



DC-DC 컨버터가 의도한 대로 동작하기 위해서는 L 의 전류가 연속이어야 한다. 하지만 i_L 파형의 최소값을 읽어보면 $i_{L\min} < 0$ 이기 때문에 전류 불연속 모드로 동작함을 알 수 있다. 이로 인해 문제가 발생하였을 것이라고 예상하였다.

컨버터가 전류 불연속 모드로 작동하는 조건은 다음과 같다.

$$I_{\min} = I_L - \frac{V_i DT}{2L} = \frac{I_0}{1-D} - \frac{V_i DT}{2L} < 0$$

주어진 조건을 식에 대입해보면

$$I_{\min} = \frac{5}{1-0.6} - \frac{40 \times 0.6 \times 50 \times 10^{-6}}{2 \times 25 \times 10^{-6}} = 12.5 - 24 = -11.5 < 0$$

이므로 컨버터가 전류 불연속 모드로 작동하는 것이다. 따라서 주어진 조건으로부터 원하는 결과를 얻을 수 없다고 판단하였다.

또한 V_0 가 약 129[V]의 값을 가지는 이유는 다음과 같이 설명할 수 있다.

컨버터가 전류 불연속 모드로 동작할 때 전압전달비 G_V 의 식은 다음과 같다.

$$G_V = \frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2D^2 TR}{L}} \right)$$

$V_i = 40[V]$ 이고 G_V 는 위의 식에 따라 계산하면

$$G_V = \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2 \times 0.6^2 \times 50 \times 10^{-6} \times 20}{25 \times 10^{-6}}} \right) = 3.229 \text{ 이다.}$$

그러므로 $V_0 = V_i \times G_V = 40 \times 3.229 = 129.16[V]$ 가 된다.

컨버터를 전류 연속 모드로 동작하게 하여 출력전압 V_0 가 100[V]가 되도록 수정하는 과정은 아래의 4) 결과 분석 및 결론에서 서술하였다.

4) 결과 분석 및 결론

Boost Converter			
구분	이론	실제	오차율
I_L	12.5	12.4547352295	0.362%
I_S	7.5	7.55316089008	0.709%
I_D	5	4.89896135126	2.021%
I_max	17.3	17.30757457140	0.044%
I_min	7.7	7.53747144514	2.111%

예제 5-7을 시뮬레이션한 결과의 오차율을 엑셀로 계산한 결과, 오차율이 0.05~2.0% 내외로 정확한 데이터를 얻었음을 확인하였다.

예제 5-8에서 전류 불연속 모드와 관련이 있는 모든 변수가 고정값이므로 주어진 조건 안에서 전류 연속 모드로 컨버터가 동작하는 것은 불가능하다. 따라서 회로에서 부하 저항 R 의 값만 수정하여 원하는 결과가 나오도록 만들어 보았다.

$I_{\min} = \frac{I_0}{1-D} - \frac{V_i DT}{2L} < 0$ 에서 부하 저항 R 의 값이 변하면 I_0 도 변하게 되므로 I_0 에 대하여 식을 정리하면 다음과 같다.

$$I_0 < (1-D) \cdot \frac{V_i DT}{2L} = (1-0.6) \cdot \frac{40 \times 0.6 \times 50 \times 10^{-6}}{2 \times 25 \times 10^{-6}} = 9.6 [A]$$

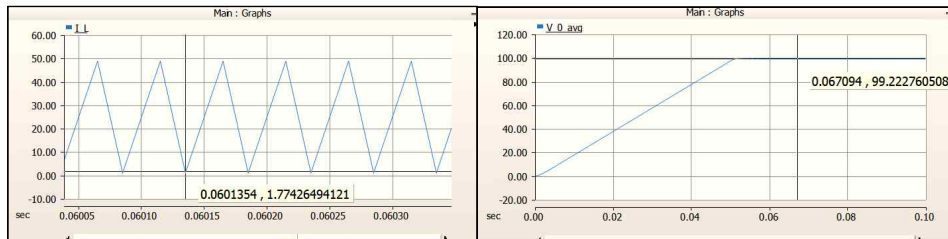
$R = \frac{V_0}{I_0}$ 이고 $V_0 = 100 [V]$ 가 되어야 하므로 $R = \frac{100}{I_0}$ 가 된다. 컨버터가 전류 연속 모드로 동작하기 위해서 I_0 는 9.6보다 큰 값을 가져야 한다. 그러므로 부하 저항 R 의 조건은 $R < 10.4167 [\Omega]$ 이 된다. 따라서 $R = 10 [\Omega]$ 으로 임의 설정하였다.

한편, 변경된 부하 저항 조건에서 출력 전압 리플 성분 Δv_0 이 $1[V]$ 이하의 값을 가지도록 하는 캐패시턴스 C 의 값을 다시 계산하면 다음과 같다.

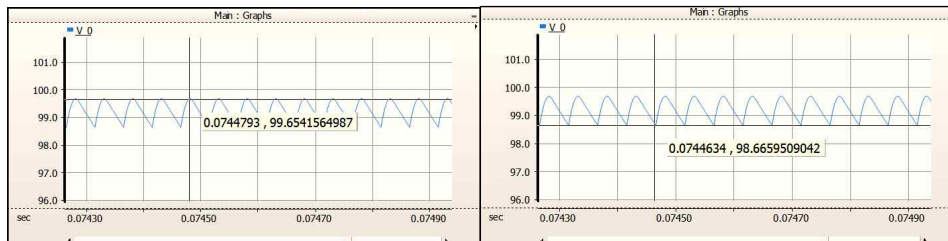
$$C = \frac{V_0 \cdot DT}{R \cdot \Delta v_0} \geq \frac{100 \times 0.6 \times (50 \times 10^{-6})}{10 \times 1} = 300 [\mu F]$$

$$C \geq 300 [\mu F]$$

그러므로 $R = 10 [\Omega]$, $C = 300 [\mu F]$ 를 회로에 적용하여 시뮬레이션하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.



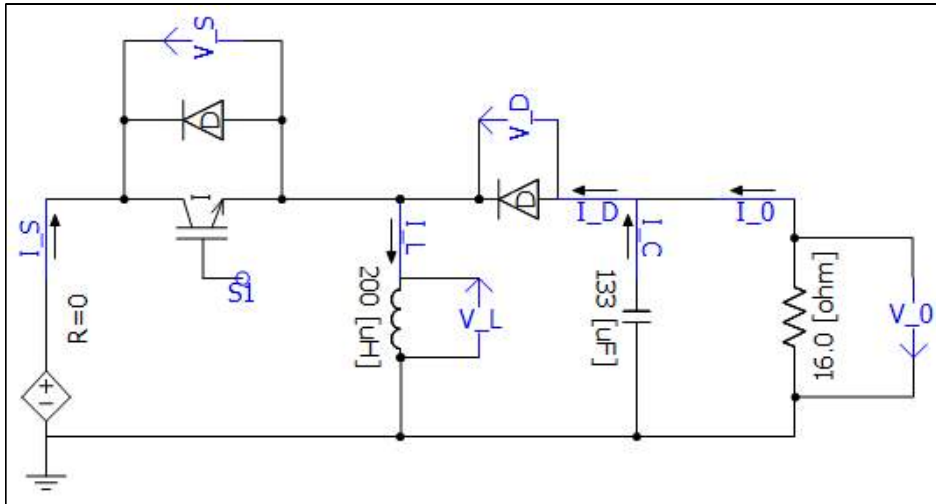
$I_{\min} > 0$ 이므로 컨버터가 전류 연속 모드로 동작하고 출력전압 $V_0 = 100 [V]$ 임을 확인하였다.



$\Delta v_0 = I_{\max} - I_{\min} = 99.6541564987 - 98.6659509042 = 0.9882055945 [V]$ 이다. 따라서 출력전압 리플 성분의 조건인 $\Delta v_0 \leq 1 [V]$ 가 만족함을 확인하였다.

3. Buck-Boost Converter

1) 회로도

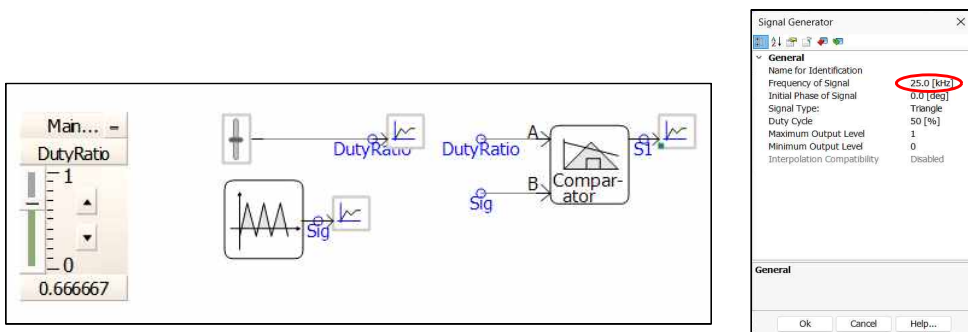


PSCAD로 설계한 Buck-Boost Converter 회로

2) 시뮬레이션 환경 설정

Duration of Run (s)	0.1
Solution Time Step (us)	0.1
Channel Plot Step (us)	0.1
Runtime	

시뮬레이션 실행 시 Runtime은 각각 0.1로 설정하였다. 가장 최적화된 결과를 볼 수 있도록 Solution Time Step과 Channel Plot Step을 같은 값으로 일치시켰다.



문제에서 주어진 조건에 따라 계산하면 듀티비는 $\frac{2}{3} = 0.666667$ 이고, Signal Generator의 주파수는 스위칭 주기 $T=40[\mu\text{sec}]$ 의 역수인 $25[\text{kHz}]$ 로 설정하였다.

캐패시터 C는 출력 전압의 리플 성분 Δv_0 를 무시할 수 있을 정도로 크다고 가정하는데, Boost C Δv_0 가 1V 이하로 설계되는 값인 $133\mu F$ 로 설정하였다.

$$C = \frac{V_0 \cdot DT}{R \cdot \Delta v_0} = I_0 \cdot \frac{DT}{\Delta v_0} \geq \frac{5 \times 2/3 \times 40 \times 10^{-6}}{1} = 133[\mu F]$$

$$\text{또한 저항 } R_0 \text{는 } R_0 = \frac{V_0^2}{P_0} = \frac{100^2}{500} = 20 [\Omega] \text{으로 설정하였다.}$$

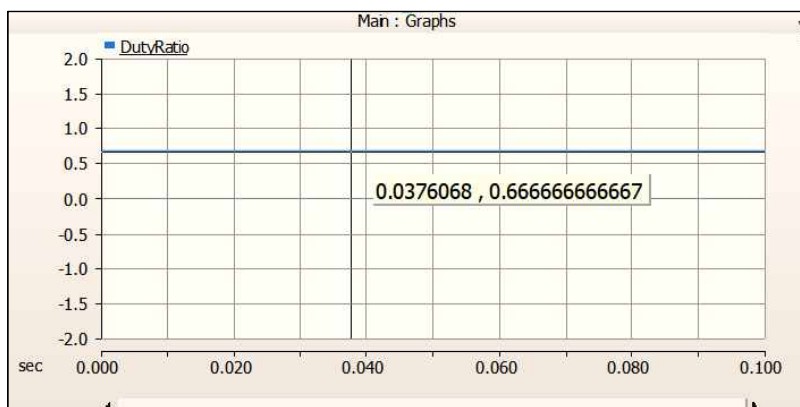
3) PSCAD 시뮬레이션 결과

① 예제 5-12

(a) 듀티비 D

주어진 Buck-Boost Converter의 듀티비를 구하는 과정은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Duty Ratio} \\ G_v &= \frac{D}{1-D} = \frac{80}{40} = 2 \\ D &= 2(1-D) \\ D &= \frac{2}{3} \end{aligned}$$

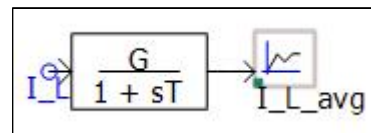
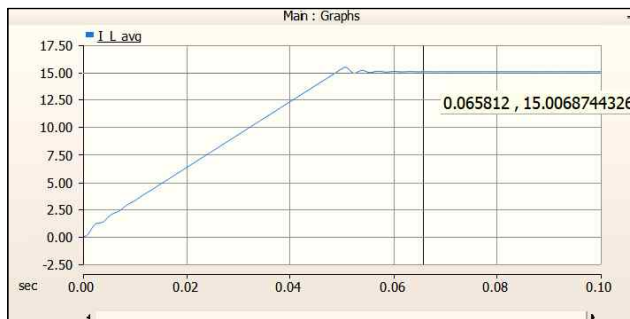


따라서 DutyRatio를 $\frac{2}{3} = 0.666667$ 으로 설정하여 시뮬레이션을 진행하였다.

(b) 인덕터의 평균전류 I_L

인덕터의 평균전류를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_L &= \frac{I_o}{1-D} \\ I_o &= \frac{P_o}{V_o} = \frac{400}{80} = 5A \\ I_L &= \frac{5}{1-\frac{2}{3}} = 15A \end{aligned}$$

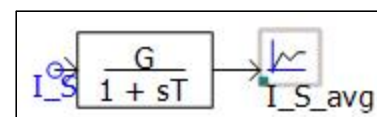
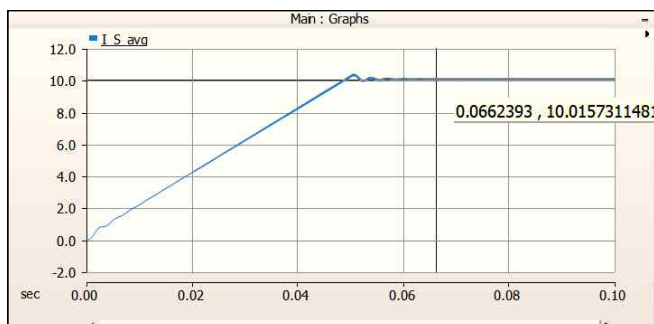


위 그래프로부터 $I_L = 15.0068744326 [A]$ 이다.

(c) 스위치 S의 평균전류 I_S

스위치 S의 평균전류를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_S &= I_L \cdot \frac{DT}{T} = D \cdot I_L = \frac{2}{3} \times 15 = 10A \end{aligned}$$



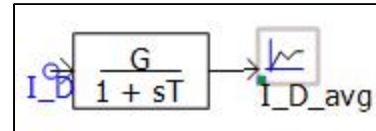
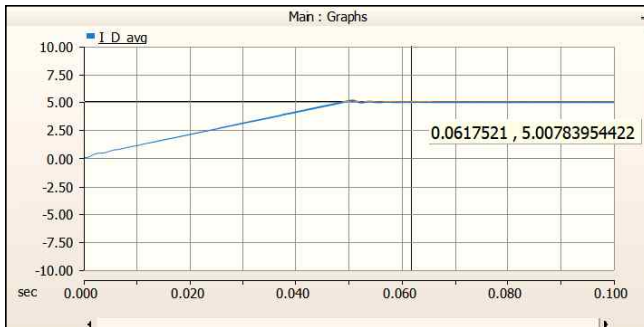
위 그래프로부터 $I_S = 10.0157311481 [A]$ 이다.

(d) 다이오드 D의 평균전류 I_D

다이오드 D의 평균전류를 구하면 다음과 같다.

다이오드 D의 평균전류 I_D

$$I_D = I_L \cdot \frac{(1-D)T}{T} = (1-D) \cdot I_L = \frac{1}{3} \times 15 = 5A$$



위 그래프로부터 $I_D = 5.00783954422 [A]$ 이다.

(e) 인덕터의 최대전류 I_{\max} 와 최소전류 I_{\min}

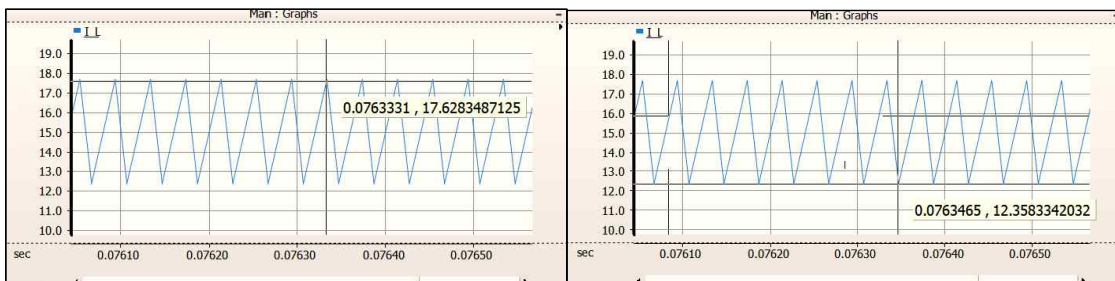
인덕터의 최대전류와 최소전류를 구하면 다음과 같다.

인덕터의 최대전류 I_{\max} 와 최소전류 I_{\min}

변위전류 $\Delta i_L = \frac{V_L}{L} \cdot DT$

$$I_{\max} = I_L + \frac{1}{2} \Delta i_L = I_L + \frac{V_L}{2L} \cdot DT = 15 + \frac{40}{2 \times (200 \times 10^{-6})} \times \frac{2}{3} \times (40 \times 10^{-6}) = 15 + \frac{8}{3} = 17.66A$$

$$I_{\min} = I_L - \frac{1}{2} \Delta i_L = I_L - \frac{V_L}{2L} \cdot DT = 15 - \frac{40}{2 \times (200 \times 10^{-6})} \times \frac{2}{3} \times (40 \times 10^{-6}) = 15 - \frac{8}{3} = 12.33A$$

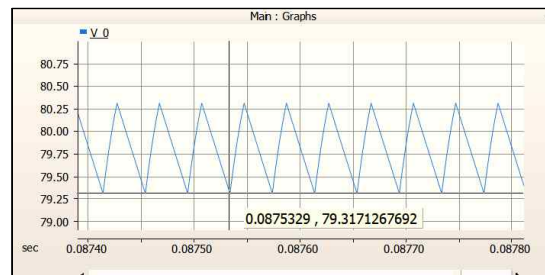
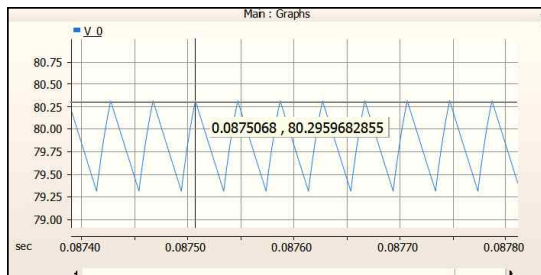


위 그래프로부터 $I_{\max} = 17.6283487125 [A]$, $I_{\min} = 12.3583342032 [A]$ 이다.

4) 결과 분석 및 결론

Buck-Boost Converter			
구분	이론	실제	오차율
I _L	15	15.0068744326	0.046%
I _S	10	10.01573114810	0.157%
I _D	5	5.00783954422	0.157%
I _{max}	17.66	17.62834871250	0.179%
I _{min}	12.33	12.35833420320	0.230%

예제 5-12를 시뮬레이션한 결과의 오차율을 엑셀로 계산한 결과, 오차율이 0.05~0.2% 내외로 정확한 데이터를 얻었음을 확인하였다.



캐패시턴스 C 를 $133[\mu F]$ 로 설정하였을 때 출력 전압의 리플 성분 Δv_0 가 $1[V]$ 이하의 값을 갖는지 정상상태에 도달한 v_0 파형을 통해 확인해보았다.

$$\Delta v_0 = v_{0\max} - v_{0\min} = 80.2959682855 - 79.3171267692 = 0.9788415163 [V]$$

따라서, $\Delta v_0 \leq 1 [V]$ 의 조건을 만족한다.