

특집 : 전력전자에서의 시뮬레이션 툴 활용

Power Supply Designer를 이용한 Forward Converter의 적용 및 특성평가

문 영 제

(다한테크 EDA사업팀 기술지원팀)

1. 개요

최근 전자제품의 소형경량화가 이루어지면서 전원장치의 고밀도화를 요구하고 있다. 이러한 기술동향에 따라 최근 DC-DC Converter를 소형, 고효율화하려는 연구가 매우 활발하게 이루어지고 있다.

각 종 전자통신기기의 직류안정화 전원으로 폭넓게 이용되고 있는 Switch Mode Power Supply(SMPS) 중에 Forward Converter에 대한 특성과 설계방법을 Simulation Program인 Power Supply Designer를 이용하여 알아보기로 한다.

2. 시뮬레이션용 소프트웨어, Power Supply Designer

Power Supply Designer는 Berkely Spice (3F.5) 엔진을 탑재하고 있으며 476개 이상의 다양한 회로소자 형태와 18,000개 이상의 개별 모델 라이브러리를 제공해 주는 아날로그 및 혼재신호 회로 시뮬레이션 프로그램이다. 1971년 U.C. Berkely대학에서 개발한 SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)는 오늘날 전자 산업을 지속적으로 발전시킨 핵심(Core) 중의 하나라고 할 수 있다. SPICE는 컴퓨터를 이용하여 전기 전자회로를 모의실험(Simulation)을 할 수 있는 회로설계 도구(Tool)이며, 이러한 시뮬레이션 프로그램으로 인하여 회로의 안정성 확보, 회로설계 시간 절약 및 검증(Verification)에 필요한 합리적

인 기술적인 근거가 마련되었다. 모든 수동(R, L, C) 및 능동(Tr, FET, Op amp) 부품 소자에 개별 Library가 제공됨으로써, 회로의 정확한 Data 검출이 가능하게 되고 출력 데이터를 통한 입력회로 수정도 쉽게 할 수 있게 되었다.

Power Supply Designer는 기존의 SPICE에서 지원하지 못하는 트랜스포머, 인덕터를 사용자가 원하는 사양으로 설계할 수 있는 Magnetics Designer와 주변 회로를 구성해서 전원 회로를 설계한 후 시뮬레이션을 할 수 있는 IsSpice로 구성되어 있다.

3. 회로의 구성

Circuit Design Specification

$$v_d = 50V, I_o = 5A, f_s = 200kHz, L_m = 100\mu F$$

$$C_f = 100\mu F, R_{load} = 1\Omega$$

$$Switch \ Duty \ Ratio = 0.4$$

그림 1은 이상적인 Forward Converter를 나타낸 것이다. PWM의 입력 Signal은 다음과 같이 Pulse파를 인가하여 준다.

$$f_s \text{가 } 200kHz \text{ 이므로, Period 설정은 } T = \frac{1}{f_s} = \frac{10^{-3}}{200} = 5\mu$$

가 된다.

Forward에서는 변압기 자화전류를 고려해야 하므로 Inductor 두 개(L1,L3)를 이용하여 그림 2와 같이 Coupling Factor로 연결을 시켜준다.

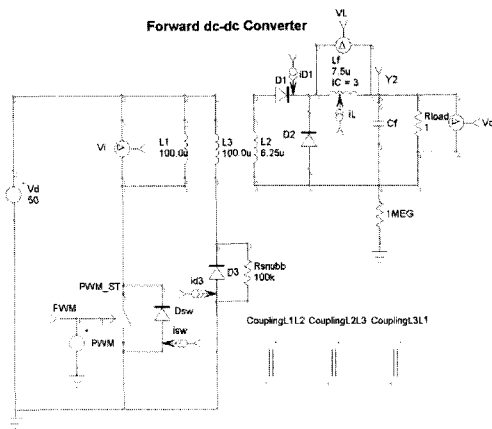


그림 1 Forward DC-DC Converter

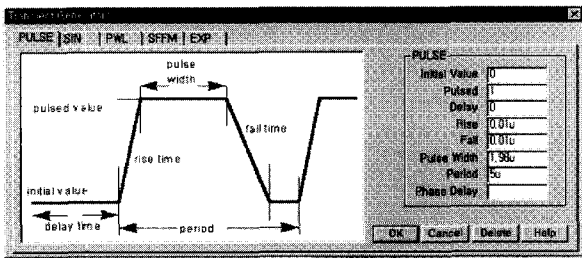


그림 2 Switching Signal의 구성

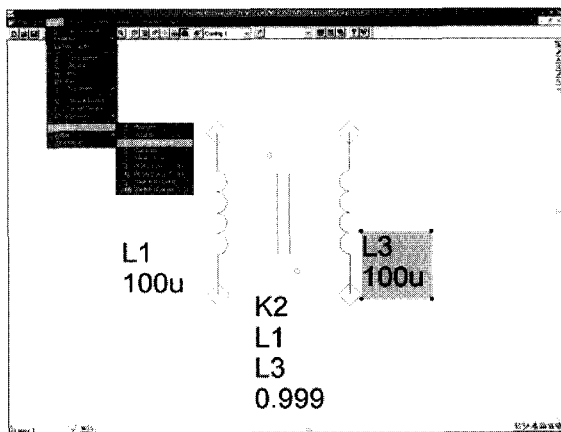


그림 3 Coupling Factor의 입력

Coupling Factor는 그림 3과 같이 Mutual Inductor를 더블클릭하여 입력하여 준다.

4. 회로의 설명

초기에, 변압기는 이상적이라고 가정하면, 스위치가 켜졌을 때 D_1 은 순방향으로 바이어스 되고 D_2 는 역 방향 바이어스 가 된다. 그러므로 그림 1에서 $v_l = \frac{N_2}{N_1} V_d - V_0$, $0 < t < t_{on}$ 이며 i_L 은 양의 값이 된다. 그러므로 i_L 은 증가한다. 스위치가 꺼졌을 때, 인덕터 전류 i_L 은 D_2 를 통해 순환되고 $v_l = -V_0$, $t_{on} < t < T_s$ 이며, v_L 은 음의 값이 되므로 i_L 은 선형적으로 감소한다. 위에 두 식을 이용하여 한 주기에 대한 인덕터 전압의 적분을 0이라 하면, 다음이 구해진다.

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{N_2}{N_1} D$$

윗 식은 포워드 변환기에서의 전압 전달비는 강압형 변환기와 비슷하게 스위치 듀티비 d 에 비례함을 나타낸다. 전압 전달비를 구하는 다른 방법은 v_L 의 평균값이 0이라는 것을 생각할 때, 한 주기에 대한 v_{oi} 의 평균값 (그림 4-(b)에서 정의)을 v_o 와 같게 놓는 방법이다.

실제의 포워드 변환기에서는 적절한 변환기 동작을 위해서 변압기 자화전류를 고려할 수 있다.

그렇지 않으면, 변압기 코어에 축적된 에너지에 의해 변환기가 파괴될 수 있다.

변압기의 자기 에너지를 회복시켜 입력 전원으로 되돌리기 위한 방법이 그림 4-(a)에 나타나 있다.

이것은 제 3의 소자 권선을 필요로 한다. 그림 4-(b)는 고려하지 않았던 누설 인덕터를 포함하는 변압기의 등가회로를 보여준다. 스위치가 켜졌을 때 $v_1 = V_d$, $0 < t < t_{on}$ 이고 i_m 은 그림 56-2 (c)에 나타난 것과 같이 0으로부터 \hat{i}_m 으로 선형적으로 증가한다.

스위치가 꺼졌을 때, $i_1 = -i_m$ 이 된다. 그림 56-2(b)에 나타난 전류 방향으로 보았을 때 $N_1 i_1 = N_3 i_3 = N_2 i_2$ 이다. D_1 때문에 $i_2 = 0$ 이고, 따라서 $i_3 = \frac{N_1}{N_3} i_m$ 이 되며, i_3 는 D_3

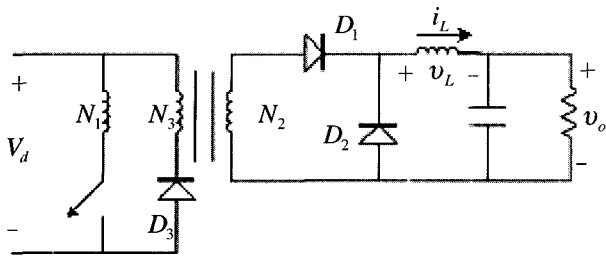
를 통하여 입력 직류전원으로 흘러 들어간다. 그림 4-(c)의 t_m 구간동안 i_3 가 흐를 때, L_m 양단의 전압과 마찬가지로 변

압기 1차측 양단의 전압은 $v_1 = -\frac{N_1}{N_3} V_d$, $t_{on} < t < t_{on} + t_m$

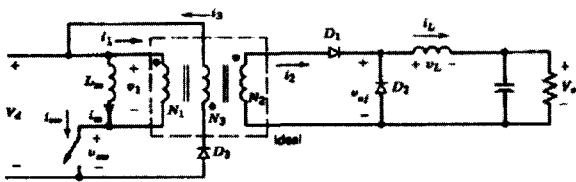
이다.

변압기가 일단 소자 되면 $i_m = 0$ 이고 $v_1 = 0$ 이 된다. L_m 양단의 전압 v_1 의 한 주기에 대한 시간적분이 0이어야 함을 고려하여 구간 t_m 을 구할 수 있다.

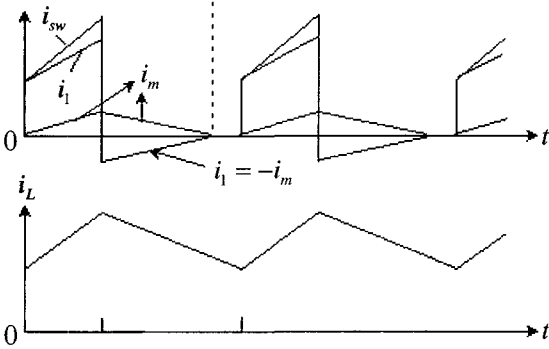
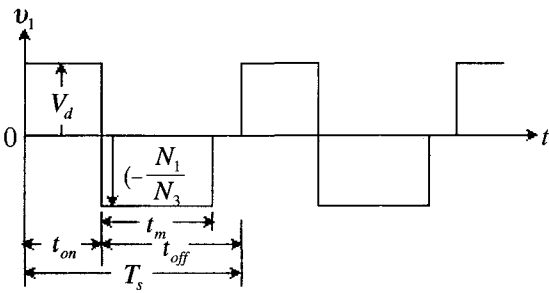
$$\frac{t_m}{T_s} = \frac{N_3}{N_1} D$$



(a)



(d)



(c)

그림 4 (a) Ideal Forward Converter Circuit
(b) Leakage Inductance를 고려한 Forward Converter Circuit
(c) Forward Converter Circuit의 각 부 파형

다음 주기가 시작하기 이전에 변압기가 완전히 소자 된다면 구할 수 있는 t_m/T_s 의 최대값은 $1-D$ 이다. 그러므로 바로 위 식을 이용하면, 주어진 권수비 N_3/N_1 로 표시되는 되

대 듀티비 D_{max} 은 $(1-D) = \frac{N_3}{N_1} D_{max}$ 이며, 또는

$$D_{max} = \frac{1}{1 + N_3/N_1}$$

앞의 해석은 1차측 권선수와 소자 권선의 권선수가 같으면 ($N_1 = N_3$) 이런 변환기에 있어 최대 듀티비는 0.5로 제한된다.

1차측 권선과 소자권선 사이에는 고전압 절연을 할 필요가 없으므로, 두 권선 사이의 누설 인덕턴스를 최소화 하기 위하여 이들 두 권선을 서로 쌍 겹겹으로 감을 수 있다. 소자권선은 오직 소자전류만을 흐려야 하므로 아주 작은 크기의 권선을 사용하는 것이 요구 된다. 변압기 자화 인덕턴스를 고려할 때, 이상적인 변압기라고 가정 한 것으로부터 유도된 $V_o = \frac{N_2}{N_1} D V_d$ 식에 의해 전압 변환비 $V_o = V_d$ 는 주어진 값으로 유지된다는 것에 주의해야 한다. 제 3의 소자 권선을 사용하는 대신, 코어의 에너지를 스위치 양단에 연결된 제너 다이오드에서 소모 시킬 수 있다.

4. 회로의 각부 파형

파형의 분석은 다음과 같이 IntuScope창을 이용하여 분석을 해 보기로 한다.

Add Waveform창을 이용하여 "Y" 항목을 선택한 뒤에

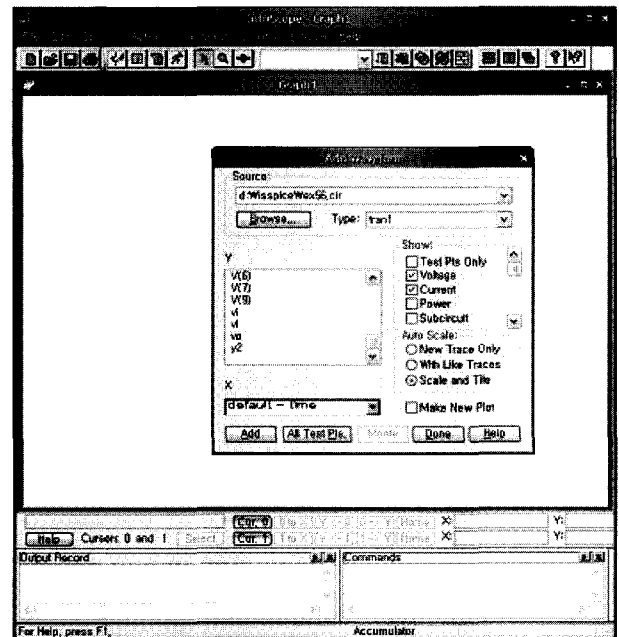
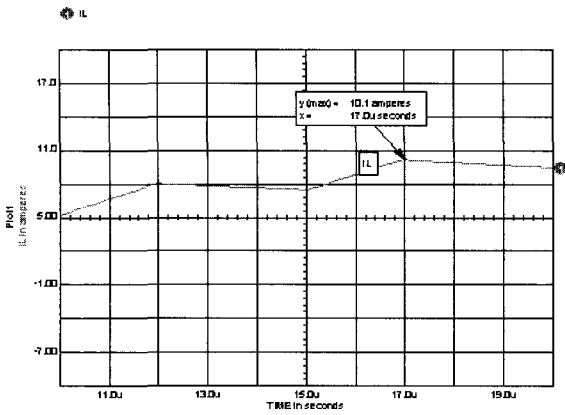
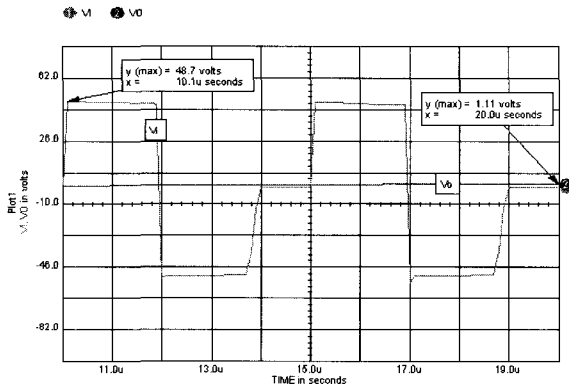


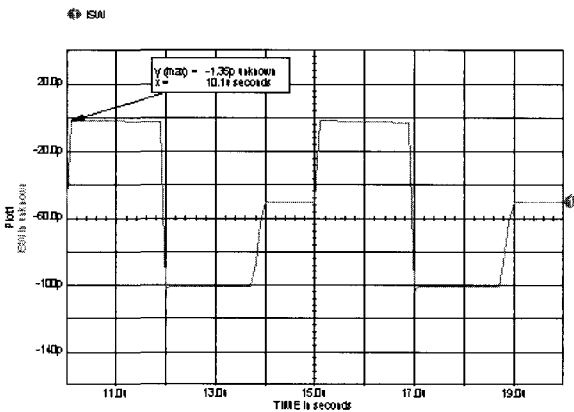
그림 5 IntuScope Window



(a)



(b)



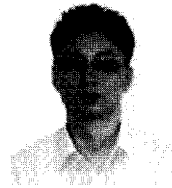
(c)

그림 6 (a) Inductor의 흐르는 전류
(b) 입력전압과 출력전압
(c) 스위칭 전류

Measurement는 Scope창의 Calculator Menu / Label항목을 보게 되면 여러 종류의 측정값(Max,Min,RMS etc)을 볼 수 있다.

그림 6은 그림 1에 대해 Scope창을 이용하여 도시해 보았다.

〈 저 자 소 개 〉



문영제(文煥堤)

1974년 1월 21일생. 1999년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 2001년~현재 (주)다한테크 EDA 사업팀 기술지원팀 근무.

Scope창에 파형을 도시한 다음 Measurement를 측정하면 된다.