

절연형 이중 강압 직류-직류 컨버터의 동특성 해석 및 제어회로 설계

하헌철, 김한상, 최병조
경북대학교

Dynamic Analysis and Control Circuit Design of Isolated Double Step-Down DC-DC Converter

Heonchul Ha, Hansang Kim, Byungcho Choi
Kyungpook National University

ABSTRACT

This paper presents practical details about control loop design and dynamic analysis for a voltage mode controlled isolated double step down DC DC converter. Graphical loop gain method is used to design the feedback compensation and analyze the closed loop performance of isolated double step down DC DC converter. The results of the control design and closed loop analysis are validated by experiments on a prototype converter.

1. 서론

절연형 이중 강압 직류 직류 컨버터는 영전압 스위칭 구동이 가능하여 스위칭 손실을 최소화 할 수 있고, 1차측 스위치의 전압 스트레스가 감소한다. 또한 추가적인 커패시터 때문에 이중 강압 특성 및 트랜스포머의 포화 문제가 해결되는 장점을 가진다.

본 논문은 절연형 이중 강압 직류 직류 컨버터의 동특성을 해석하고, 우수한 페루프 특성을 제공하기 위한 전압 모드 제어를 제안한다. 절연형 이중 강압 직류 직류 컨버터는 PS PWM(위상 변이 펄스 폭 변조) 컨버터와 유사한 전압 및 전류 파형을 가진다. 또한 PS PWM 컨버터의 2차측 전원부는 벽 컨버터와 유사하게 동작을 한다. 그리고 PS PWM 컨버터는 누설 인덕터를 이용하여 영전압 스위칭을 한다. 그 경우 시비율의 손실이 발생하게 되어 소신호 등가 회로가 기존의 벽 컨버터와 다르게 유도된다. 따라서 다르게 유도된 소신호 등가 회로를 적용하여 전달함수를 예측하고 실제 측정값과 비교한다. 그리고 벽 컨버터의 전달함수와 유사한 결과를 나타내는 점을 이용하여 벽 컨버터의 페루프 설계과정을 따라서 우수한 페루프 특성을 제공하도록 보상회로와 루프이득을 설계한다. 이론적 내용은 PSIM 및 PSpice의 시뮬레이션을 이용하여 해석하고, 실험을 통해 검증한다.

2. 전압 제어 절연형 이중 강압 직류-직류 컨버터

2.1 전원단의 전압 및 전류 파형과 소신호 등가 모델

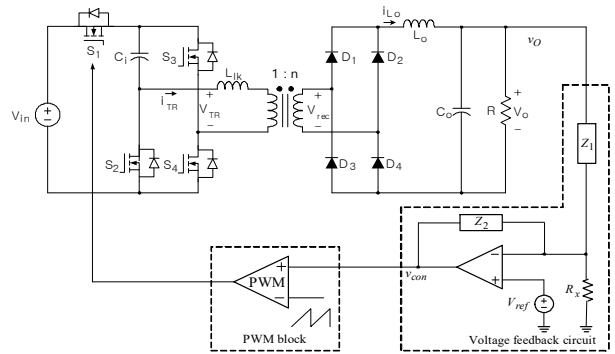


그림 1 절연형 이중 강압 직류-직류 컨버터 및 제어회로
Fig. 1 Isolated double step down DC-DC converter and control circuit

그림 1은 전압 제어 방식을 적용한 절연형 이중 강압 직류 직류 컨버터의 회로도이다. 절연형 이중 강압 직류 직류 컨버터의 주요 파형은 그림2와 같다.

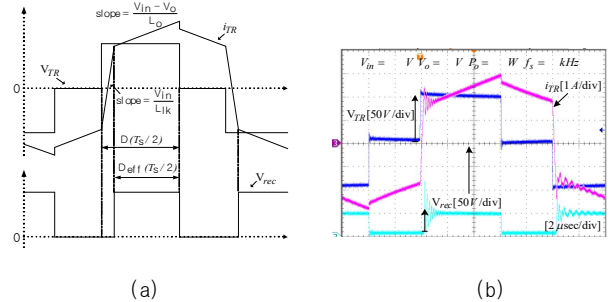


그림 2 (a)절연형 이중 강압 직류-직류 컨버터의 주요 파형 (b)측정파형
fig. 2 (a)Main waveform of isolated double step down DC-DC converter (b)Measurement waveform

그림 2의 파형에서 1차측의 시비율에 비해서 2차측의 시비율이 감소한다. 따라서 시비율의 손실을 고려한 소신호 등가 회로를 이용한다. 소신호 등가 회로는 그림 3과 같이 나타낸다.

2차측 필터 인덕터 전류의 변화에 의한 시비율 변조는 식 (1)과 같고, 입력 전압의 변화에 의한 시비율 변조는 식 (2)와 같다.

$$\hat{d}_i = -\frac{R_d}{n V_{in}/2} \hat{i}_L \quad (1)$$

$$\hat{d}_v = -\frac{R_d L}{n(V_{in}/2)^2} \hat{v}_{in} \quad (2)$$

여기서

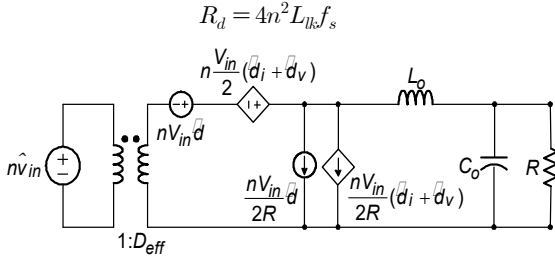


그림 3 절연형 이중 강압 직류-직류 컨버터의 소신호 등가 회로

fig. 3 Small-signal circuit model of isolated double step down DC-DC converter

제어 대 출력 전달함수는 다음과 같이 유도 된다.

$$G_{vd}(s) \equiv \frac{nV_{in}/2}{s^2 L_o C_o + s(\frac{L_o}{R} + R_d C_o) + \frac{R_d}{R} + 1} \quad (3)$$

그림 3의 소신호 등가 회로 모델을 따라 G_{vd} 를 측정할 결과는 그림 4와 같다.

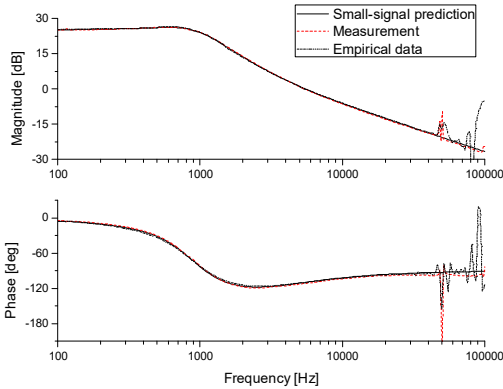


그림 4 제어 대 출력 전달 함수

fig. 4 Control to output transfer function

2.2 루프이득과 전압 보상 회로 설계

$$T_m(s) = G_{vd}(s)F_v(s)F_m \quad (4)$$

$$F_m = 1/V_m \quad (5)$$

절연형 이중 강압 직류 직류 컨버터의 루프이득(T_m)은 그림 4로부터 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 F_m 은 PWM 이득이며 식 (5)로 나타낼 수 있다. V_m 은 램프 신호의 높이이다. 루프이득은 제어 대 출력 전달 함수와 전압 보상 회로의 전달 함수에 의해서 결정된다. 절연형 이중 강압 직류 직류 컨버터의 제어 대 출력 전달함수가 백 컨버터의 제어 대 출력 전달 함수와 유사한 특성을 가지므로 절연형 이중 강압 직류 직류 컨버터의 안정화와 동특성 향상을 위해 전압 보상 회로(F_v)를 식 (6)과 같이 설계한다.

$$F_v(s) = \frac{Z_2(s)}{Z_1(s)} = \frac{K_v(1+s/\omega_{z1})(1+s/\omega_{z2})}{s(1+s/\omega_{p1})(1+s/\omega_{p2})} \quad (6)$$

식 (6)은 저주파 영역에서 위상을 감소시키는 극점을 보상하기 위한 두 개의 영점을 배치하고, ESR 영점을 보상하기 위한

극점이 추가되며 두 번째 극점이 고주파에 위치하는 3극점 2영점 구조의 보상기 전달함수이다. 위의 전압 보상기 전달함수를 이용하여 전압 보상을 설계한 결과 측정 및 시뮬레이션을 하여 그림 5에 루프이득을 나타냈다.

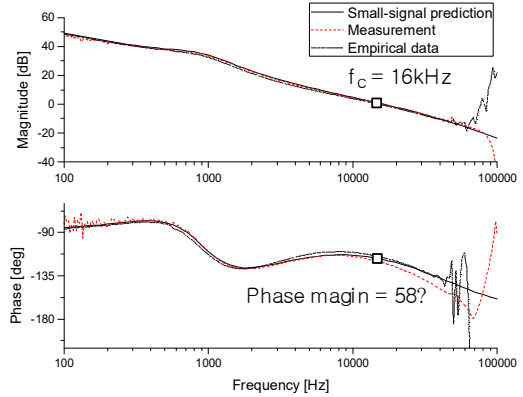


그림 5 절연형 이중 강압 직류-직류 컨버터의 루프이득
fig. 5 Loop gain of isolated double step down DC - DC converter

3. 결론

전압 제어 방식을 적용한 절연형 이중 강압 직류 직류 컨버터의 동특성 해석 및 제어회로 설계를 수행하였다. 도식적 루프 이득 방법을 이용하여 루프이득을 설계하였고, 페루프의 루프이득과 안정도를 검증하였다. PSIM 및 PSpice 시뮬레이션 결과와 실험 결과 비교를 통해 해석의 타당성을 검증하였다. 측정은 PSM3750 임피던스 분석기를 이용하였다. 실험 측정상 노이즈에 의한 측정 오차를 제외하고는 모든 주파수 영역에서 시뮬레이션과 실험이 잘 일치 한다.

표 1 절연형 이중 강압 직류-직류 컨버터의 파라미터

Table 1 Parameter of Isolated double step-down converter

V_{in}	200 [V]	V_o	24 [V]
P_o	125 [W]	f_s	50000 [Hz]
L_{lk}	9.44 [μ H]	$N_1 : N_2$	1 : 0.45

본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 대학CT연구센터 육성지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP 2015 H8501 15 1006)

참고 문헌

- [1] Sabate, J.A, V. Vlatkovic, R.B Ridley, F.C. Lee, and B.H. Cho, "Design considerations for high voltage high power full bridge zero voltage switched pwm converter", in IEEE APEC Rec, pp. 275 - 284, 1990, March.
- [2] V. Vlatkovic, J. A. Sabate, R. B. Radley, F. C. Lee, and B. H. Cho, "Small signal analysis of the phase shifted PWM converter," IEEE Trans. Power Electron., vol. 7, pp. 128 - 135, 1992, Jan.
- [3] B. Choi, Pulsewidth Modulated DC to DC Power Conversion: Circuits, Dynamic, and Control Designs. John Wiley & Sons, 2013.