

LLC 공진형 컨버터의 소신호 모델링 분석 및 실험적 검증

김진우, 이태영, 조영훈, 최규하
 건국대학교 전력전자연구소

Small Signal Modeling Analysis and Experimental Verification of LLC Resonant Converter

Jinwoo Kim, Taeyoung Lee, Younghoon Cho, Gyu Ha Choe
 Power Electronics Lab., Konkuk University.

ABSTRACT

LLC resonant DC DC converter is widely used in many kinds of applications such as battery energy storage systems, wireless power transfer and high voltage power supply. It is because of characteristics like high efficiency, power density, isolation, wide power level and stability enhancement at high switching frequency. Small signal modeling helps to design controller of the converter by approximating the behavior of nonlinear system with linear state equations. This paper presents comparison between small signal modeling analysis and experimental results of LLC resonant converter.

1. 서론

최근 산업계에서 제품의 가격 경쟁력을 높이기 위해 높은 전력밀도, 고효율의 특성을 갖는 컨버터를 요구한다. 이와 같은 조건을 만족하기 위해 스위칭 주파수를 높여서 전력밀도를 키우는 방법이 있지만, 스위칭 손실이 증가하여 효율이 떨어지게 된다. 이러한 이유로 수동소자의 공진 및 스위치 턴온 시 영전압 스위칭(ZVS), 다이오드 턴오프 시 영전류 스위칭(ZCS)을 하여 스위칭 손실을 감소시켜 효율을 높일 수 있는 공진형 컨버터가 많이 사용된다. 따라서 본 논문에서는 변압기 2차 측에 공진탱크를 갖는 공진형 컨버터 모델에 대해 소신호 모델링을 하였고, 이를 실험결과와 비교하였다.

2. 소신호 모델링 및 실험결과

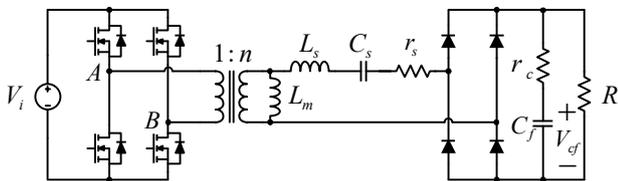


그림 1 LLC 직렬 공진형 컨버터 모델
 Fig. 1 LLC series resonant converter model

그림 1은 본 논문에서 소신호 모델링을 한 2차 측에 공진 탱크를 갖는 컨버터의 회로도이다. 소신호 모델링을 진행하기 위해 입력전압 V_i 를 변압기 2차 측 양단전압으로, 그리고 필터 커패시터 전압 V_{cf} 는 다이오드 정류기 앞단 전압으로 등가화 하여 식 (1) (3)과 그리고 그림 2와 같이 표현하였다.

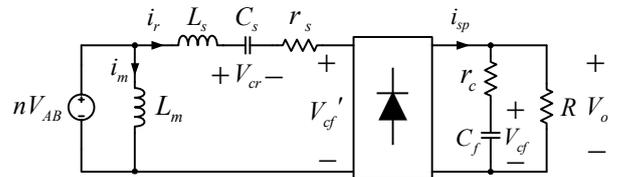


그림 2 LLC 공진형 컨버터 등가 회로
 Fig. 2 Equivalent circuit of LLC resonant converter

$$nV_{AB} = L_s \frac{di_r}{dt} + v_{cr} + i_r r_s + \text{sgn}(i_r) V_{cf} = L_m \frac{di_m}{dt} \quad (1)$$

$$V_{cf}' = \text{sgn}(i_r) V_{cf} \quad (2)$$

$$\text{sgn}(i_r) = -1 \text{ (if } i_r < 0 \text{)}, \quad 1 \text{ (if } i_r > 0 \text{)} \quad (3)$$

2.1 LLC 공진형 컨버터 소신호 모델링

그림 2의 nV_{AB} 는 식 (1)에서 입력전압을 등가화한 그림 1의 변압기 2차 측 양단전압이며, V_{cf}' 은 출력 필터 커패시터 양단전압을 등가화한 다이오드 정류기 앞단 전압이다. KCL, KVL을 통해 미분방정식을 구하고, 미분방정식들의 각 변수들을 푸리에 변환의 sine 성분과 cosine 성분으로 구별하여 식을 다시 정리한다.^[1] 본 논문에서는 공진탱크 전류 i_r 과 공진 커패시터 전압 V_{cr} 그리고 자화 인덕터 전류 i_m 을 각각 i_s , i_c 와 v_s , v_c 그리고 i_{ms} , i_{mc} 로 나타내었다. 이를 각 변수의 직류성분으로 나타내어 정리하면 다음과 같다.^[2]

$$(r_s + R_e)I_s + L_s \Omega_s I_c + V_s = n v_{es} = n \frac{4}{\pi} V_i \quad (4)$$

$$-L_s \Omega_s I_s + (r_s + R_e)I_c + V_c = n v_{ec} = 0 \quad (5)$$

$$I_s - C_s \Omega_s V_c = 0 \quad (6)$$

$$I_c + C_s \Omega_s V_s = 0 \quad (7)$$

$$L_m \Omega_s I_{mc} = n v_{es} \quad (8)$$

$$-L_m \Omega_s I_{ms} = 0 \quad (9)$$

위의 식 (4) (9)는 LLC 공진형 컨버터의 정상상태 방정식을 나타낸다. 그리고 식 (4) (9)에 표 1의 파라미터 값을 대입하면, 각 변수들의 직류성분 I_s , I_c , V_s , V_c , I_{ms} , I_{mc} 의 값을 구할 수 있다.^[2] 위의 정상상태 방정식을 선형화하기 위해 특정 동작점을 표 1과 같이 지정해 각 변수들을 직류성분과 섭동하는 교류 성분으로 고려해 정리하면 다음과 같은 소신호 상태공간방정식을 얻을 수 있다.^[1]

표 1 공진형 컨버터 시스템 파라미터 값

Table 1 Values of the resonant converter system parameters

Parameter	Value	Parameter	Value
V_i	60[V]	C_s	250[nF]
n	9/13	r_s	10[m Ω]
L_m	105[μ H]	C_f	30[μ F]
L_s	11[μ H]	r_c	4[m Ω]
R	50[Ω]	V_o	41[V]
f_s	100[kHz]	f_r	96[kHz]

$$A = \begin{pmatrix} -\left(\frac{H_{ip}+r_s}{L_s}\right) - \left(\frac{\Omega_s L_s + H_{ic}}{L_s}\right) - \frac{1}{L_s} & 0 & 0 & 0 & -\frac{H_{vcf}}{L_s} \\ \left(\frac{\Omega_s L_s - G_{ip}}{L_s}\right) - \left(\frac{G_{ic}+r_s}{L_s}\right) & 0 & -\frac{1}{L_s} & 0 & 0 & -\frac{G_{vcf}}{L_s} \\ \frac{1}{C_s} & 0 & 0 & -\Omega_s & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_s} & \Omega_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\Omega_s \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \Omega_s & 0 \\ \frac{J_s}{C_f r_c} & \frac{J_{ic}}{C_f r_c} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{r'_c}{RC_f r_c} \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} \frac{nk_1}{L_s} & \frac{nk_2}{L_s} & -w_o I_c & 0 \\ 0 & 0 & w_o I_s & 0 \\ 0 & 0 & -w_o V_c & 0 \\ 0 & 0 & w_o V_s & 0 \\ \frac{nk_1}{L_m} & \frac{nk_2}{L_m} & -w_o I_{mc} & 0 \\ 0 & 0 & w_o I_{ms} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2r'_c}{\pi r_c C_f} \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\hat{x} = (\hat{i}_s \hat{i}_c \hat{v}_s \hat{v}_c \hat{i}_{ms} \hat{i}_{mc} \hat{v}_{cf})^T \hat{u} = (\hat{v}_i \hat{d} \hat{w}_{sn} \hat{i}_{sp})^T$$

$$C = \begin{pmatrix} J_s & J_{ic} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{r'_c}{r_c} \end{pmatrix} \quad D = 0 \quad (11)$$

$$k_1 = \frac{4}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{2} D\right), \quad k_2 = 2V_i \cos\left(\frac{\pi}{2} D\right) \quad (12)$$

$$H_{ip} = \frac{4V_{cf} I_c^2}{\pi I_r^3}, \quad H_{ic} = -\frac{4V_{cf} I_s I_c}{\pi I_r^3}, \quad H_{vcf} = \frac{4}{\pi} \frac{I_s}{I_r} \quad (13)$$

$$G_{ip} = -\frac{4V_{cf} I_s I_c}{\pi I_r^3}, \quad G_{ic} = \frac{4V_{cf} I_c^2}{\pi I_r^3}, \quad G_{vcf} = \frac{4}{\pi} \frac{I_s}{I_r} \quad (14)$$

$$J_s = \frac{2r'_c}{\pi} \frac{I_s}{\sqrt{I_s^2 + I_c^2}}, \quad J_{ic} = \frac{2r'_c}{\pi} \frac{I_c}{\sqrt{I_s^2 + I_c^2}} \quad (15)$$

식 (10) (11)은 LLC 공진형 컨버터의 소신호 모델 상태공간 방정식의 행렬을 나타낸다. 식 (11)은 시스템의 출력방정식의 행렬이고, 식 (12) (15)는 상태방정식에서 편의상 정의한 함수이다. 제시한 상태공간방정식을 Mathworks사의 Matlab으로 상태방정식을 정리하면, 시스템의 입력 \hat{v}_i , \hat{d} , \hat{w}_{sn} , \hat{i}_{sp} 에 대한 출력전압의 전달함수를 각각 구할 수 있다. 상태방정식의 입력 중 \hat{w}_{sn} 과 \hat{v}_i 에 대한 시스템 출력전압의 응답 보드선도를 각각 그림 3과 4에 나타내었다. 그림 3은 주파수와 출력전압 즉, 공진형 컨버터의 Control to Out에 대한 보드선도에 해당된다. 위의 보드선도 위상여유는 약 50도, 이득여유는 약 40dB 정도로 안정하다.

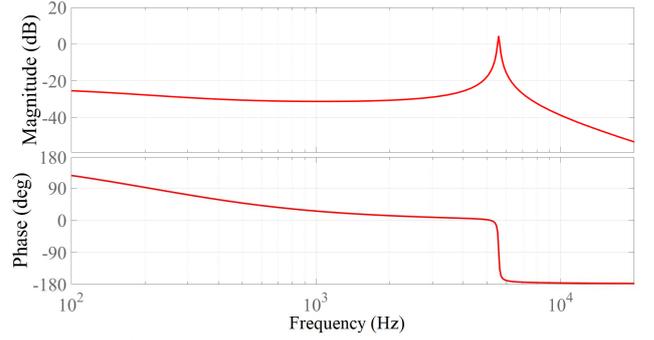


그림 3 \hat{w}_{sn} 변화에 따른 출력전압의 응답특성

Fig. 3 Response of Output Voltage respect to \hat{w}_{sn}

2.2 실험결과

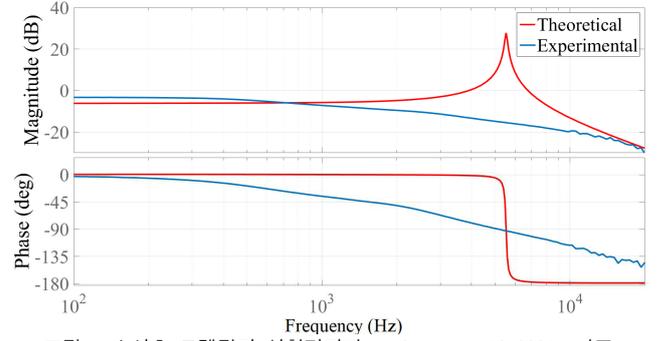


그림 4 소신호 모델링과 실험결과의 audio susceptibility 비교

Fig. 4 Comparison between theoretical and experimental result of audio susceptibility

실험은 표 1의 파라미터를 갖는 하드웨어를 설계해 N4L사의 PSM1735를 이용하여 입력전압을 주파수 Sweep 하였다. 주파수 Sweep 범위는 Nyquist Sampling을 고려해 스위칭 주파수의 1/5인 20kHz 까지 하였다. 그 결과를 그림 4에 소신호 모델 보드선도와 비교해 첨부하였다. 공진형 컨버터의 실험 보드선도에 비해 소신호 모델에서는 공진점이 생겨 차이를 보였다.

3. 결론

본 논문에서는 LLC 공진형 컨버터의 전달함수와 안정도를 확인하기 위해 EDF(Extended Describing Function) 개념을 이용해 소신호 모델링을 하였고, 실험결과와 비교하였다. 소신호 모델과 실험결과가 완전히 일치하지는 않으나 넓은 주파수 대역에서 안정도를 갖는 공진형 컨버터의 특성을 확인 할 수 있었다. 추후 제시한 2차주 공진형 컨버터의 소신호 모델에 대한 연구가 더 필요하다.

이 논문은 산업통상부와 한국산업기술진흥원이 지원하는 건국대학교 공학교육혁신사업의 지원을 받아 작성되었음

참고 문헌

- [1] C. H. Chang, E. C. Chang, C. A. Cheng, H. L. Cheng, S. C. Lin, "Small Signal Modeling of LLC Resonant Converters Based on Extended Describing Function," in Proceedings of the IEEE International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C), pp.365-368, 2012.
- [2] E. X. Yang, F. C. Lee, and M. M. Jovanovic, "Small signal modeling of LCC resonant converter," Proc. IEEE Power Electronics Specialist Conference, Jun. 1992, pp. 941-948.