

Three-Level 컨버터의 전류 제어에 관한 연구

배진용* · 김 용** · 백수현** · 이은영*** · 최근수§
 *특허청 · **동국대학교 · ***대림대학 · §디지아이

The current control of Three-Level converter

Jin-Yong Bae* · Yong Kim** · Soo-Hyun Baek** · Eun-Young Lee*** · Geun-Soo Choi§
 *Korean Intellectual Property Office · **Dongguk University · ***Daelim College · §DGI

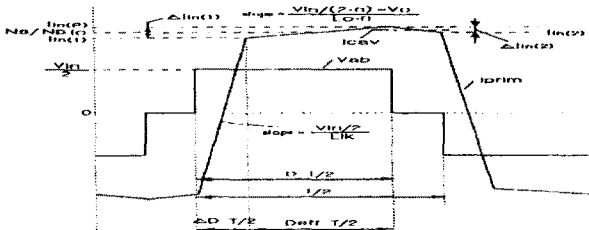
Abstract - This paper presents a detailed small-signal and transient analysis of a Three-Level zero-voltage-switched PWM converter designed for high voltage, high power applications using an average model.

1. 서 론

본 연구에서는 Three-Level 컨버터^[1]의 전압제어, 최대전류제어^[2], 평균전류제어^[3] 방식에 따른 컨버터의 입·출력 전압비(Audio susceptibility), 출력전압 및 전류와 인덕터 전류비, 출력 임피던스, 제어(미세한 듀티비의 변화)와 출력 전압 및 인덕터 전류비에 대한 루프 특성을 분석하고자 한다. 따라서, 본 논문에서는 분석된 모델링을 바탕으로 전류모드 기법에 따른 제어 특성을 2[kW]급 Three-Level 컨버터를 대상으로 해석하고자 한다.

2. 본 론

2.1 Three-Level 컨버터의 제어방식



<그림 1> TL 컨버터 변압기 1차측의 전압 및 전류 파형^[1]

그림 1은 Three-Level 컨버터의 변압기 1차측 전압 및 전류에 대한 이론적인 파형을 나타낸다.

변압기 1차측의 $I_{in(1)}$, $\Delta I_{in(1)}$, $I_{in(P)}$, $I_{in(2)}$ 는 식(1)~(4)로 나타낼 수 있다.^[1]

$$I_{in(1)} = \frac{V_{in}/2}{L_{ik}} \frac{\Delta D}{2} \frac{T}{2} \quad (1)$$

$$\Delta I_{in(1)} = \frac{V_{in}/2 - V_o}{L_o} D_{eff} \frac{T}{2} \quad (2)$$

$$I_{in(P)} = I_{in(1)} + \Delta I_{in(1)} \quad (3)$$

$$I_{in(2)} = \frac{N_s}{N_p} \left\{ I_o + \frac{\Delta I}{2} - \frac{V_o}{L_o} (1-D) \frac{T}{2} \right\} \quad (4)$$

여기서, ΔD : 듀티비 감소분
 D_{eff} : 2차측 듀티비
 N_p : 1차측 권선수
 N_s : 2차측 권선수
 ΔI : 출력 필터의 인덕터 전류 리플
 D : 1차측 듀티비

컨버터의 각 듀티 D_{eff} , ΔD , D 는 식(5)~(9)로 나타낼 수 있다.^[1]

$$D_{eff} = \frac{N_p}{N_s} \frac{V_o}{V_{in}/2} \quad (5)$$

$$\Delta D = \frac{I_{in(1)} + I_{in(2)}}{\frac{V_{in}/2}{L_{ik}} \frac{T}{2}} \quad (6)$$

$$\Delta D = \frac{N_s}{N_p} \frac{2I_o}{\frac{V_{in}/2}{L_{ik}} \frac{T}{2}} \left\{ 2I_o - \frac{V_o}{L_o} (1-D) \frac{T}{2} \right\} \quad (7)$$

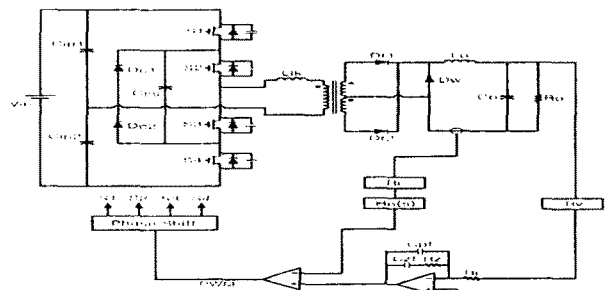
$$D = D_{eff} + \Delta D \quad (8)$$

$$D = \frac{1 + \frac{4L_{ik}f - L_{lk}}{R'_o L'_o}}{\frac{1}{D_{eff}} - \frac{L_{lk}}{L'_o}} \quad (9)$$

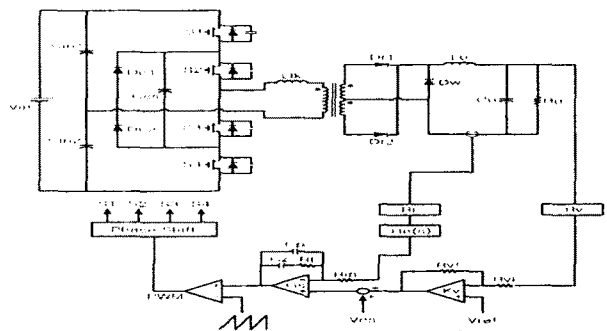
여기서,

$$R'_o = R_o \left(\frac{N_p}{N_s} \right)^2 : 1차로 환산된 2차측 부하 저항$$

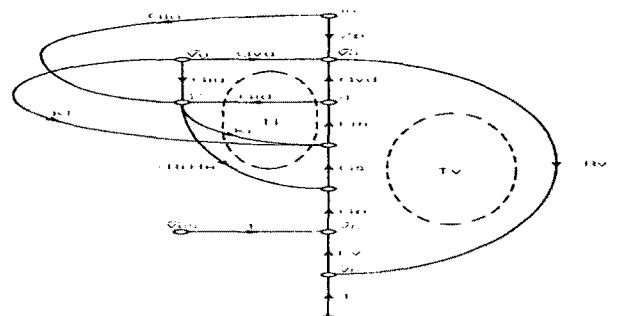
$$L'_o = L_o \left(\frac{N_p}{N_s} \right)^2 : 1차로 환산된 2차측 출력 인덕턴스$$



<그림 2> 최대전류제어 TL 컨버터^[2]



<그림 3> 평균전류제어 TL 컨버터^[3]



<그림 4> TL 컨버터 신호흐름선도^[4]

2.2 Three-Level 컨버터의 각 전달함수

그림 4로부터 Three-Level 컨버터의 각 전달함수를 구하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.^[1]

제어 방식에 따른 변조기의 이득

1) 전압제어

$$F_m = \frac{d}{v_c} = \frac{1}{S_e T} = \frac{1}{V_p} \quad (10)$$

2) 최대전류제어 (Ridley 모델)^[2]

$$F_m = \frac{d}{v_c} = \frac{1}{S_e + S_n} = \frac{1}{\left(\frac{1}{V_p} + \frac{1}{\frac{V_g/2n - V_a}{L_o}}\right) T} \quad (11)$$

3) 평균전류제어 (Tan 모델)^[3]

$$F_m = \frac{d}{v_c} = \frac{1}{(S_e + S_n') T} \quad (12)$$

여기서,

$$S_e = \frac{1}{V_p}$$

$$S_n = \frac{V_o(1-D)}{L_o D}$$

$$S_n' = \omega_i S_n \left[DT + \left(\frac{1}{\omega_z} - \frac{1}{\omega_p} \right) (1 - e^{-\omega_p DT}) \right]$$

$$\omega_i = \frac{1}{R_{in}(C_p + C_z)} \quad \omega_z = \frac{1}{R_f C_z}$$

$$\omega_p = \frac{C_p + C_z}{R_f C_p C_z}$$

그림 4로부터 Three-Level 컨버터의 전체루프이득(Over all Loop Gain)을 구하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.^[4]

$$T_1 = T_i + T_v \quad (13)$$

Three-Level 컨버터의 외부루프이득(Outer Loop Gain)을 구하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.^[4]

$$T_2 = \frac{T_v}{1 + T_i} \quad (14)$$

여기서, $T_i = F_m G_{id}(s) R_i H_e(s) G_s(s)$

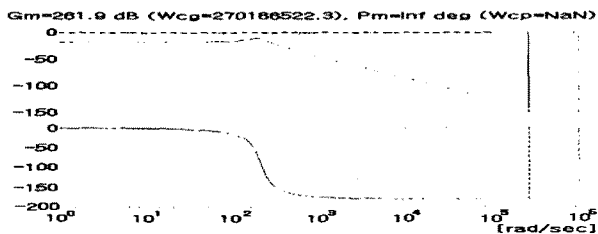
$$T_v = F_m G_{vd}(s) R_v K_v G_p(s) G_s(s)$$

2.3 전달함수 분석

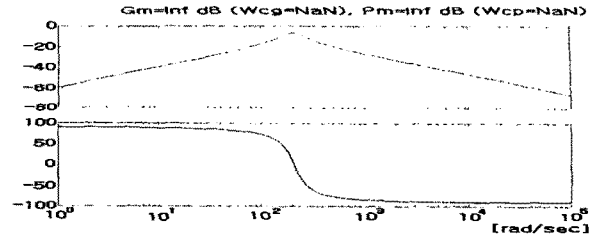
Three-Level 컨버터의 전류 제어에 대하여 분석하기 위하여 입력 DC 400V, 출력 DC 27V/60A, 2kW급의 시작품을 대상으로 하였다.

〈표 1〉 TL 컨버터에 사용된 소자와 회로 파라미터

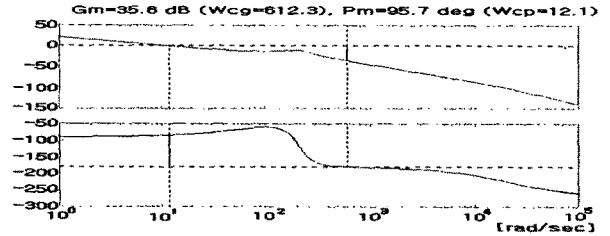
입력전압 (V_{in})	400 V
출력전압 (V_o)	27 V
최대출력 (P_o)	2.0 kW
주 변압기	EC 90의 1/2. TDK $N_p : N_s = 13 : 4$, $L_{lk} = 2.933\mu\text{H}$
입력단 커패시터 (C_{in})	2820 μF
Flying 커패시터 (C_{ss})	100 μF
주 스위치(S)	FM2G50US60. FAIRCHILD
2차측 정류 다이오드 (D_r)	DEXI 2X121-02A. IXYS
2차측 환류 다이오드 (D_w)	DEXI 30-02A. IXYS
스위치 커패시터 (C_{sw})	2680 pF
변압기 권선간 커패시터 (C_a)	15.15 nF
출력단 인덕터 (L_o)	1.030 mH
출력단 커패시터 (C_o)	22400 μF
스위칭 주파수 (f)	40 kHz



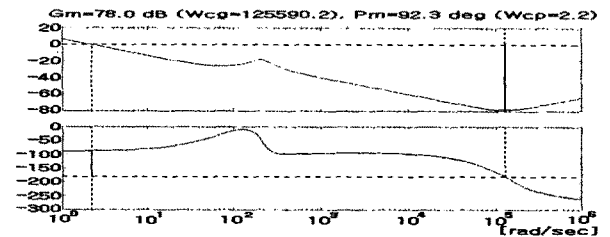
〈그림 5〉 입력전압-출력전압비(G_{vd})의 보드선도



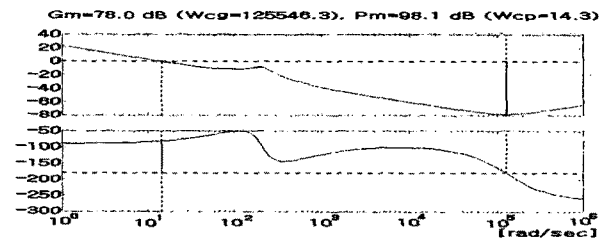
〈그림 6〉 출력 임피던스(Z_p)의 보드선도



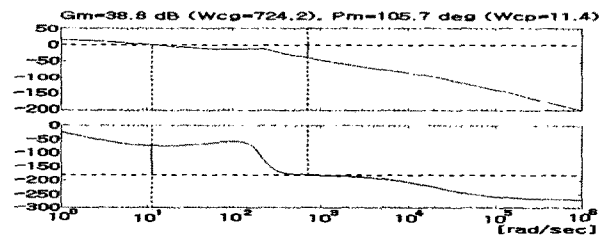
〈그림 7〉 전압루프이득(T_v)의 보드선도



〈그림 8〉 전류루프이득(T_i)의 보드선도



〈그림 9〉 전체루프이득(T_1)의 보드선도



〈그림 10〉 외부루프이득(T_2)의 보드선도

3. 결 론

본 논문에서는 Three-Level 컨버터의 전압제어, 최대전류제어, 평균전류제어에 대한 제어기의 모델링 방법을 알아보고 전류제어시 임·출력 전압비(Audio susceptibility), 출력 임피던스, 전압루프이득, 전류루프이득, 전체루프이득, 외부루프이득의 보드선도를 분석하였다.

〔참 고 문 헌〕

- [1] Jin-Yong Bae, and Yong Kim, "A Study on the Loss Analysis for the Three Level Converter," KIEE Journal of Electrical Engineering, Vol. 52, No. 10, pp. 514-521, Oct. 2003.
- [2] R.B. Ridley, "A New Continuous Time Model for Current Mode Control," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 6, No. 2, pp. 271-280, Apr. 1991.
- [3] F.D. Tan, and R.D. Middlebrook, "A unified model for current-programmed converters," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 10, No. 4, pp. 397-407, July 1995.
- [4] R. Ridley, B.H. Cho, and F.C. Lee, "Analysis and Interpretation of Loop Gains of Multiloop-controlled Switching Regulators," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 3, No. 4, pp. 489-498, 1998.