

임계특성에 따른 Three-Level 컨버터의 모델링

배진용\*, 김 용\*\*, 조규만\*\*\*, 권순도<sup>§</sup>, 이규훈<sup>§§</sup>  
 \*특허청, \*\*동국대학교, \*\*\*한국폴리텍대학IV, <sup>§</sup>대림대학, <sup>§§</sup>스마트비전텍

The modeling of Three-Level converter according to critical characterist

Jin-Yong Bae\*, Yong Kim\*\*, Kyu-Man Cho\*\*\*, Soon-Do Kwon<sup>§</sup>, Kyu-Hoon Lee<sup>§§</sup>  
 \*Korean Intellectual Property Office, \*\*Dongguk University, \*\*\*Korea Polytechnic College IV,  
<sup>§</sup>Daelim College, <sup>§§</sup>Smartvision Tech

**Abstract** - This paper discusses the modeling of Three-Level converter according to critical characterist.

1. 서 론

기존의 소신호 모델<sup>[1-5]</sup>을 이용하여 구한 전류연속모드(CCM)의 전달함수에서 Erickson이 제안한 Power-Source 모델<sup>[3]</sup>과 스위칭 평균 모델<sup>[4]</sup>을 이용하여 전류불연속모드(DCM)의 컨버터 모델을 제안하며, 2[kW]급 Three-Level 컨버터에 대하여 영전압 스위칭 임계전류와 전류연속모드(CCM) 및 전류불연속모드(DCM) 임계전류를 분석하고자 한다.

2. 본 론

2.1 Three-Level 컨버터

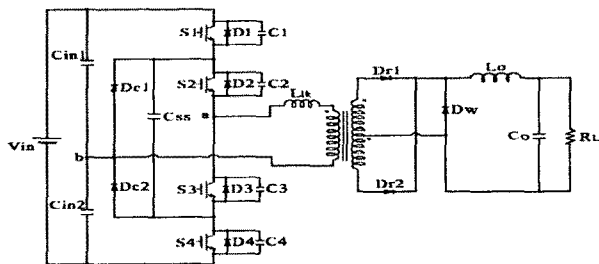
그림 1은 Three-Level DC/DC 컨버터 회로를 나타낸다. 주 스위치의 안정된 영전압 스위칭 동작을 위하여 고주파 변압기의 누설 인덕터는 스위칭 커패시터와 고주파 변압기의 기생 커패시터를 충·방전할 수 있도록 설계하여야 한다. 즉 누설 인덕터에 저장된 에너지가 식(1)을 만족할 때 실제적인 ZVS 동작이 이루어진다.<sup>[5]</sup>

$$\frac{1}{2} L_{lk} I_{lk}^2 > \frac{4}{3} C_{sw} \left(\frac{V_{in}}{2}\right)^2 + \frac{1}{2} C_{tr} \left(\frac{V_{in}}{2}\right)^2 \quad (1)$$

여기서, C<sub>sw</sub> : 일반적인 스위칭 커패시터  
 C<sub>tr</sub> : 고주파 변압기의 권선간 커패시터 (기생 커패시터)

결과적으로 ZVS 동작을 할 수 있는 1차측 임계 전류는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{crit(ZVS)} = \frac{V_{in}}{2} \sqrt{\frac{2}{L_{lk}} \left(\frac{4}{3} C_{sw} + \frac{1}{2} C_{tr}\right)} \quad (2)$$



<그림 1> Three-Level DC/DC 컨버터 회로

2.2 전류연속모드(CCM) 스위칭 소신호 모델

입력 전압과 듀티의 미소 변동분을 고려하여 상태공간평균화 방법을 이용하여 입력vs출력과 듀티vs출력의 관계식을 식(3),(4)와 같이 나타낼 수 있다.<sup>[6]</sup>

$$\frac{v_o(s)}{v_i(s)} = C^T (sI - A)^{-1} b \quad (3)$$

$$\frac{v_o(s)}{d(s)} = C^T (sI - A)^{-1} b \times [(A_1 - A_2)X + (b_1 - b_2)V_i] + (C_1^T - C_2^T)X \quad (4)$$

식(3),(4)에서 전류연속모드(CCM)에서 입력vs출력과 듀티vs출력의 전달함수를 변압기 권선비를 고려하여 일반화하면 식(5)(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_{vg}(s) = G_{zo} \frac{1}{n \left[ 1 + \frac{s}{Q\omega_o} + \left(\frac{s}{\omega_o}\right)^2 \right]} \quad (5)$$

$$G_{vd}(s) = G_{do} \frac{1 - \frac{s}{\omega_z}}{n \left[ 1 + \frac{s}{Q\omega_o} + \left(\frac{s}{\omega_o}\right)^2 \right]} \quad (6)$$

표 1은 컨버터 종류에 따른 각 파라미터를 나타낸다.

<표 1> 컨버터 종류에 따른 각 파라미터(CCM)

종류	G <sub>zo</sub>	G <sub>do</sub>	ω <sub>o</sub>	Q	ω <sub>z</sub>
Buck	D	V/D	1/√LC	R√C/L	∞
Boost	1/D'	V/D'	D'/√LC	D'R√C/L	D' <sup>2</sup> R/L
Bosk-Boost	-D/D'	V/DD' <sup>2</sup>	D'/√LC	D'R√C/L	D' <sup>2</sup> R/DL

여기서, n = N1 / N2 : 변압기 권선비

2.3 전류불연속모드(DCM) 스위칭 소신호 모델

본 논문은 Erickson이 제안한 Power Source 모델<sup>[3]</sup>을 이용하여 전류불연속모드(DCM)에서 스위칭 소신호 모델에 대하여 살펴보고, 그 타당성을 검증하고자 한다.

전류불연속모드(DCM) 컨버터의 동작특성으로부터 i<sub>1</sub>(t)의 한주기 평균 전류를 구하면 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\langle i_1(t) \rangle_{T_s} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T_s} i_1(t) dt = \frac{q_1}{T_s} \quad (7)$$

식(7)로부터 한주기 동안 전하 q<sub>1</sub>을 구하면 식(8)로 나타낼 수 있다.

$$q_1 = \int_t^{t+T_s} i_1(t) dt = \frac{1}{2} d_1(t) T_s i_{pk} \quad (8)$$

식(17)로부터 <i<sub>1</sub>(t)><sub>T<sub>s</sub></sub>와 <i<sub>2</sub>(t)><sub>T<sub>s</sub></sub>를 구하면

$$\langle i_1(t) \rangle_{T_s} = \frac{d_1(t)^2 T_s}{2L} \langle v_1(t) \rangle_{T_s} \quad (9)$$

$$\langle i_2(t) \rangle_{T_s} = \frac{d_1(t)^2 T_s}{2L} \frac{\langle v_1(t) \rangle_{T_s}^2}{\langle v_2(t) \rangle_{T_s}} \quad (10)$$

식(9)로부터

$$\langle i_1(t) \rangle_{T_s} = \frac{\langle v_1(t) \rangle_{T_s}}{R_e(d_1)} \quad (11)$$

여기서, R<sub>e</sub>(d<sub>1</sub>) = 2L / d<sub>1</sub><sup>2</sup> T<sub>s</sub>

식(10)으로부터

$$\langle i_1(t) \rangle_{T_s} \langle v_1(t) \rangle_{T_s} = \frac{\langle v_1(t) \rangle_{T_s}^2}{R_e(d_1)} = \langle p(t) \rangle_{T_s} \quad (12)$$

전류연속모드(CCM)와 전류불연속모드(DCM)의 경계인 임계전류를 변압기 권선비를 고려하면, 식(13)으로 나타낼 수 있다.<sup>[7]</sup>

$$I_{crit(CCM/DCM)} = \frac{1}{n} \frac{1-D}{D} \frac{V_g}{R_e(d)} \quad (13)$$

여기서,  $V_g$  : 입력전압

$$R_e(d) = \frac{2L}{D^2 T_s}$$

식(11),(12)에서 듀티, 전압 및 전류의 미소변동분을 고려하여  $i_1$ 과  $i_2$ 의 미소변동분을 식(14)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{i}_1 &= \frac{\hat{v}_1}{r_1} + j_1 \hat{d} + g_1 \hat{v}_2 \\ \hat{i}_2 &= -\frac{\hat{v}_2}{r_2} + j_2 \hat{d} + g_2 \hat{v}_1 \end{aligned} \quad (14)$$

전류불연속모드(DCM)에서 입력vs출력과 듀티vs출력의 전달함수를 변압기 권선비를 고려하여 구하면 식(15)(16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_{vg}(s) = \frac{G_{go}}{n \left(1 + \frac{s}{\omega_p}\right)} \quad (15)$$

$$G_{vd}(s) = \frac{G_{do}}{n \left(1 + \frac{s}{\omega_p}\right)} \quad (16)$$

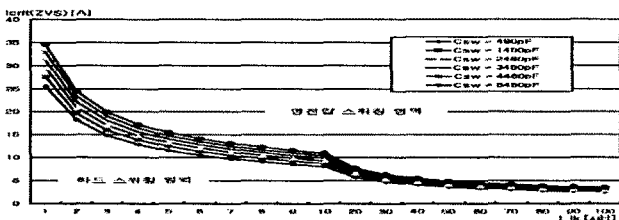
여기서,

$$G_{go} = g_2 \frac{R \times r_2}{R + r_2} \quad G_{do} = j_2 \frac{R \times r_2}{R + r_2}$$

$$\omega_p = \frac{R + r_2}{C(R \times r_2)}$$

<표 3> 컨버터 종류에 따른 각 파라미터(DCM)

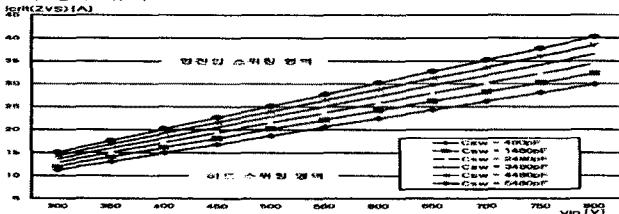
종류	$\beta_1$	$j_1$	$r_1$
Buck	$\frac{1}{R_e}$	$\frac{2(1-M)V_1}{DR_e}$	$R_e$
Boost	$\frac{1}{(M-1)^2 R_e}$	$\frac{2MV_1}{D(M-1)R_e}$	$\frac{(M-1)^2}{M} R_e$
Bosk-Boost	0	$\frac{2V_1}{DR_e}$	$R_e$
종류	$\beta_2$	$j_2$	$r_2$
Buck	$\frac{2-M}{MR_e}$	$\frac{2(1-M)V_1}{DMR_e}$	$M^2 R_e$
Boost	$\frac{2M-1}{(M-1)^2 R_e}$	$\frac{2V_1}{D(M-1)R_e}$	$(1-M)^2 R_e$
Bosk-Boost	$\frac{2M}{R_e}$	$\frac{2V_1}{DMR_e}$	$M^2 R_e$



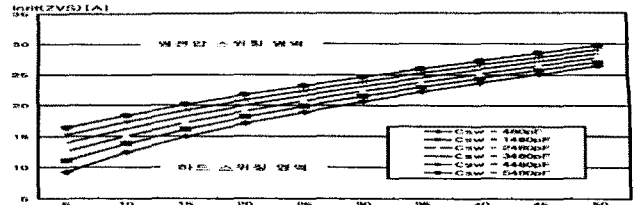
<그림 2> 누설 인덕턴스에 따른 영전압 스위칭 임계전류 ( $V_{in} = 400[V]$ ,  $C_{Tr} = 15.15[nF]$ )

### 3. 결 론

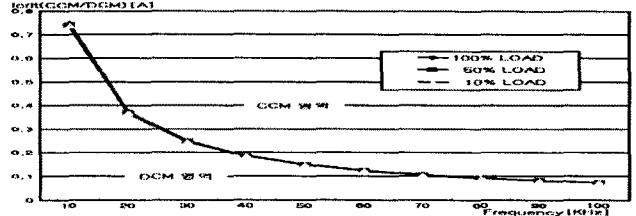
본 논문에서는 스위치 평균 모델을 이용한 Three-Level 컨버터의 모델링 및 영전압 스위칭 임계전류와 CCM/DCM 임계전류에 관하여 살펴보았다.



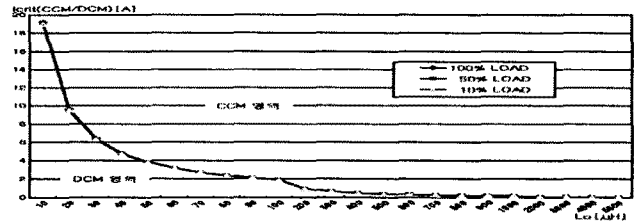
<그림 3> 입력전압에 따른 영전압 스위칭 임계전류 ( $L_{ik} = 2.933[uH]$ ,  $C_{Tr} = 15.15[nF]$ )



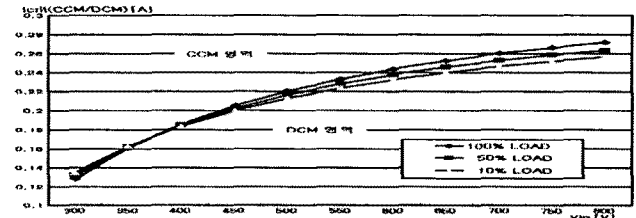
<그림 4> 변압기 권선간 커패시터에 따른 영전압 스위칭 임계전류 ( $V_{in} = 400[V]$ ,  $L_{ik} = 2.933[uH]$ )



<그림 5> 주파수에 따른 CCM/DCM 임계전류 ( $V_{in} = 400[V]$ ,  $L_o = 1.030[mH]$ )



<그림 6> 출력 인덕턴스에 따른 CCM/DCM 임계전류 ( $V_{in} = 400[V]$ ,  $Freq = 40[kHz]$ )



<그림 7> 입력전압에 따른 CCM/DCM 임계전류 ( $L_o = 1.030[mH]$ ,  $Freq = 40[kHz]$ )

[참 고 문 헌]

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] R.W. Erickson, "Advances in Averaged Switch Modeling," Fourth Brazilian Congress of Power Electronics(COBEP'97), Dec. 1997.
- [4] A.S. Kislovski, "Dynamic Analysis of Switching-Mode DC/DC Converter," Van Nostrand Reinhold publication. pp. 20~59. 1991.
- [5] L.H. Mweene, C.A. Wright, and M.F. Schlecht, "A 1 kW, 500 kHz front-end converter for a distributed power supply system," Proceeding of APEC'89, pp. 423~432, 1989.
- [6] K.K. Sum, "Switch Mode Power Conversion Basic Theory and Design," New York and Basel publication, pp. 209~227. 1984.
- [7] Sanjaya Maniktala "Switching Power Supply Design & Optimization" McGRAW-HILL publication, pp. 153~161. 2004.