

# EMI 저감을 위한 대역폭 확산 변조 기법이 적용된 Dual-Active-Bridge 컨버터의 소신호 모델링

정권교, 이준석, 정지훈  
울산과학기술원

## Small-Signal Modeling of Dual-Active-Bridge Converters Employing Spread Spectrum Modulation Technique for EMI Reduction

Gwon-Gyo Jung, Jun-Suk Lee, Jee-Hoon Jung  
Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)

### ABSTRACT

본 논문은 EMI 저감을 위해 대역폭 확산 변조 기법(Spread Spectrum Modulation; SSM)을 적용한 Dual-Active-Bridge (DAB) 컨버터의 소신호 모델을 제안하고, 주파수 영역에서 컨버터의 동특성을 분석하고자 한다. 고정된 스위칭 주파수에서 전력변환장치가 동작하면 해당 주파수와 그 고조파에서 높은 EMI가 발생한다. SSM은 스위칭 주파수를 가변하여 EM 노이즈의 분포를 확산하여 EMI를 저감 하는 기법이다. SSM을 적용했을 때 DAB 컨버터는 스위칭 주파수가 고정되지 않고 설계된 대로 변동하게 된다. 이 때, DAB 컨버터의 특성은 동작 주파수에 영향을 크게 받으므로 주파수 변동이 고려된 소신호 모델이 필요하다. 본 논문에서 SSM이 적용된 DAB 컨버터의 소신호 모델을 유도하고, 3.3 kW의 시제품을 이용한 실험을 통해 소신호 모델의 정확성을 검증한다.

### 1. 서론

전기차, 신재생 에너지, ESS와 같은 직류에 대한 수요가 증가하고 있다. 특히 신재생 에너지의 공급이 증가하면서 현재의 교류 배전 시스템을 대체하기 위한 직류 배전 시스템이 연구되고 있고 전력을 전달하기 위한 양방향 직류-직류 컨버터 구조 중 Dual-Active-Bridge (DAB) 컨버터는 절연과 양방향 전력 전달이 가능해 직류 배전에 사용될 수 있다.

EMI는 전기적 회로에서 외부 전원에 의해 에너지가 방사 또는 전도되어 원하지 않는 노이즈가 발생하는 현상이다.[1] 전력변환장치에서는 스위칭으로 인해 전도성 EMI와 방사성 EMI를 생성한다.[2][3] 이러한 EMI는 전력변환장치 주변 회로에 간섭을 일으킬 수 있고, 이로 인해 전자기 적합성(EMC)을 위한 표준이 존재한다. 오늘날 전자기기를 출시하기 위해선 이러한 규정을 만족해야 한다.

산업과 가정에 연결되는 직류 배전의 특성상 양방향 직류-직류 컨버터에서 발생하는 EMI를 저감할 필요가 있다. EMI를 저감하기 위해서 EMI 필터를 사용하지만, EMI 필터에 사용되는 수동소자들로 인해 전력밀도가 감소하고 제작비용도 높아지게 된다.

EMI 저감을 위한 확산 대역폭 변조 기법(Spread Spectrum Modulation; SSM)은 전력변환장치의 동작 주파수를 가변하여 식(1)의 Carson의 법칙에 의해 동작 주파수와 고조파에서 발생하는 EMI를 주변 주파수로 Power를 확산하여 EMI 침투값을

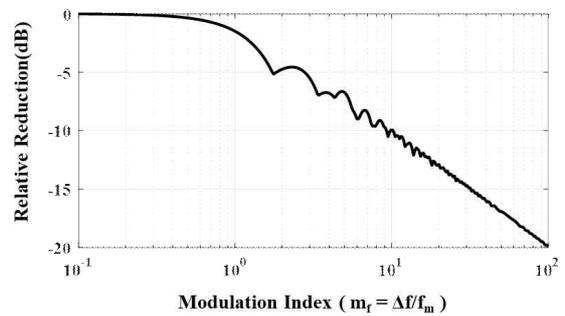


그림 1  $m_f$  값에 따른 EMI 저감수치  
Fig. 1 EMI reduction curve based on  $m_f$

저감 하는 기술이다. SSM의 EMI 저감 성능은 동작 주파수 가변 방식, 동작 주파수 변동 폭, 동작 주파수 변동 속도 등 여러 요인에 의해서 달라진다. [4]에서는 각 요인 별로 EMI 저감 성능이 어떻게 달라지는지 분석했다. 아래의 수식은 SSM에 의한 스위칭 함수와 변조지수를 나타낸다.

$$s(t) = A_0 \cos(2\pi f_c t + 2\pi \Delta f \int_{-\infty}^t \zeta(\tau) d\tau) \quad (1)$$

$$m_f = \Delta f / f_m$$

여기서  $\zeta(t)$ 은 SSM의 주파수 가변 방식을 나타내고  $f_m$ 은 동작주파수 변동 속도,  $\Delta f$ 는 동작주파수 변동 폭을 나타낸다. SSM의 EMI 성능을 나타내는 지표로  $m_f$ 가 있다.  $m_f$ 는 식(1)과 같이  $\Delta f$ 에  $f_m$ 을 나눈 값으로  $m_f$ 에 따른 EMI 침투값 저감 수치는 그림 1과 같이 나타난다. 즉, 높은  $\Delta f$  낮은  $f_m$ 에서 높은 EMI 저감 성능을 가진다.

$$V_o = \frac{n V_s}{2 f_s L} R_{load} \phi (1 - \phi) \quad (2)$$

EMI 규격을 만족하기 위해서는 높은  $m_f$ 가 필요하다. DAB 컨버터에서 EMI 저감 성능을 위해 주파수 변동 폭을 넓히게 되면 식 (2)의 DAB 출력 전압 식에 의해서 주파수 변동에 의한 출력 전압 변동이 커지게 된다. DAB에 SSM을 적용했을 때 발생하는 출력전압 리플은 부하의 안정성에 영향을 미칠 수 있으므로 리플에 관한 고려가 필요하다. 본 논문에서는 소신호 모델을 통해 SSM으로 인한 주파수 변동이 출력전압에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. SSM이 적용된 DAB 소신호 모델링

### 2.1 일반화 평균 모델링

시변 비선형 시스템인 전력변환장치를 소신호 모델링을 하기 위해선 평균화와 선형화 과정이 진행되어야 한다. DAB 컨버터는 1차측 직류-교류 변환, 2차측 교류-직류 변환을 통해 전력을 전달한다. 이때 변환된 교류 전류는 인덕터에 흐르게 된다. 인덕터에 한 주기 동안 흐르는 전류의 평균이 0이므로 고전적인 평균화 모델링 기법을 이용한 평균화 과정이 불가능하다. 따라서 크기와 위상 성분을 가지는 교류의 특성을 이용하여 Generalized Average Model (GAM) 방식을 사용한 평균화를 통한 모델링을 진행한다. GAM은 푸리에 급수를 이용하여 각 성분의 고조파와 고조파의 실수항과 허수항에 대해 각각 평균화를 진행하는 방법이다. 푸리에 급수로 나타낸 각 상태 변수의 기본 주파수는 DAB의 동작 주파수이다. 연산량과 모델의 복잡성을 고려하여 기본 주파수에서 GAM을 진행하였다.

### 2.2 일반화 평균 모델링을 이용한 DAB 소신호 모델

GAM을 이용한 DAB 소신호 모델링에 사용되는 상태변수는  $\langle v_o \rangle_0, \langle i_L \rangle_{1R}, \langle i_L \rangle_{1I}$ 가 있다. 각각 출력전압의 직류 성분, 인덕터 전류의 기본주파수의 실수항과 허수항이다. 출력전압은 직류성분이 지배적이고 인덕터 전류는 기본주파수 성분이 지배적이므로 출력전압의 기본주파수 성분 인덕터 전류의 직류 성분은 고려하지 않았다. GAM을 이용한 DAB의 대신호 모델은 [5]의 식을 이용해 식 (3)과 같이 나타내었다,

식 (3)의 대신호 모델을 SSM의 주파수 변동을 고려한 소신호 모델로 변환하기 전에 각 상태 변수는 식 (4)와 같이 대신호와 소신호로 나눠 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} d &= D + \Delta d \\ \langle v_o \rangle_0 &= \langle V_o \rangle_0 + \Delta \langle v_o \rangle_0 \\ \langle i_L \rangle_{1R} &= \langle I_L \rangle_{1R} + \Delta \langle i_L \rangle_{1R} \\ \langle i_L \rangle_{1I} &= \langle I_L \rangle_{1I} + \Delta \langle i_L \rangle_{1I} \end{aligned} \quad (4)$$

식 (3), (4)를 이용한 위상 변화에 대한 출력전압의 소신호 모델은 [5]에 소개 되었다. [5]에서는 안정적으로 동작하기 위한 최적 제어기 설계를 위한 DAB 위상차 변동 - 출력전압 소신호 모델을 유도하였다. 하지만 SSM이 적용된 DAB에서는 주파수 변동에 둔감하도록 제어기를 설계해야 한다. 이를 위해 본 논문에서는 SSM에 의한 출력전압 변동을 분석하기 위해

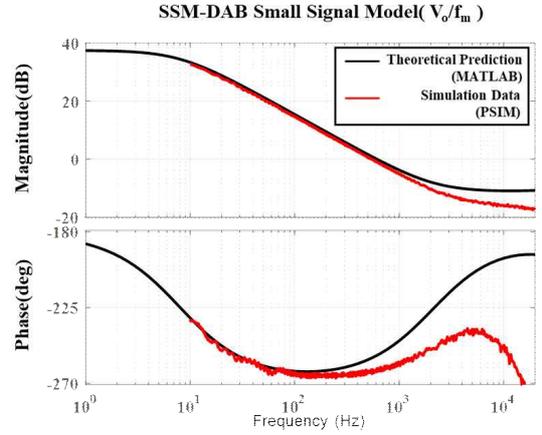


그림 2 SSM이 적용된 DAB의 동작주파수 변동 - 출력전압 소신호 모델

Fig. 2 Variation of the switching frequency to output voltage small signal model of the DAB with SSM

동작주파수 변동 - 출력전압 소신호 모델을 유도하였다. 동작주파수 변동에 대한 모델링을 하기 위해 동작주파수  $\omega_s$ 를 대신호와 소신호로 나누어 나타내었고, 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다. 동작주파수의 변동  $\Delta\omega_s$ 를 SSM의 파라미터인  $\Delta f$ 와  $f_m$ 으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \omega_s &= \omega_{s,center} + \Delta\omega_s \\ &= \omega_{s,center} + (2\pi\Delta f) f_m \end{aligned} \quad (5)$$

고정된  $\Delta f$ 를 가질 때  $f_m$  변화에 따른 출력 전압 변동에 대한 소신호 모델을 식 (3), (4), (5)를 이용하여 식 (6)과 같이 나타내었다. 식 (4)의 모델의 정확성을 Matlab에서의 이론적 분석과 PSIM의 AC Sweep을 사용하여 비교하였다. 주파수 영역에서 이론적 예측(Matlab)과 모의실험(PSIM)에서의 결과를 그림 2에 나타내었다. 이때 모델링에 사용된 설계값은 표 1에 나타내었다, 10 kHz이상의 고주파 영역에서의 오차를 제외하고 SSM에 의한 주파수 변동에 대한 소신호 모델의 정확성을 확인 할 수 있다. 고주파 영역에서의 오차는 PSIM 시뮬레이션의 Time Step과 DAB 컨버터의 이득의 비선형성에 의해 나타난다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \langle v_o \rangle_0 \\ \langle i_L \rangle_{1R} \\ \langle i_L \rangle_{1I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{k_1}{RC} & \frac{4k_1 \sin D\pi}{\pi C} & -\frac{4k_1 \cos D\pi}{\pi C} \\ \frac{2k_1 \sin D\pi}{\pi L} & \frac{R_1 + k_2}{L} & \omega_s \\ \frac{2k_1 \cos D\pi}{\pi L} & -\omega_s & -\frac{R_1 + k_2}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \langle v_o \rangle_0 \\ \langle i_L \rangle_{1R} \\ \langle i_L \rangle_{1I} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{C} \\ 0 & 0 \\ -\frac{2}{\pi L} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_m \\ I_o \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$Y = \begin{bmatrix} k_1 & -\frac{4k_2 \sin D\pi}{\pi} & -\frac{4k_2 \cos D\pi}{\pi} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \langle v_o \rangle_0 & \langle i_L \rangle_{1R} & \langle i_L \rangle_{1I} \end{bmatrix}^T$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta \langle v_o \rangle_0 \\ \Delta \langle i_L \rangle_{1R} \\ \Delta \langle i_L \rangle_{1I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{k_1}{RC} & \frac{4k_1 \sin D\pi}{\pi C} & -\frac{4k_1 \cos D\pi}{\pi C} \\ \frac{2k_1 \sin D\pi}{\pi L} & \frac{R_1 + k_2}{L} & \omega_s \\ \frac{2k_1 \cos D\pi}{\pi L} & -\omega_s & -\frac{R_1 + k_2}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \langle v_o \rangle_0 \\ \Delta \langle i_L \rangle_{1R} \\ \Delta \langle i_L \rangle_{1I} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 2\pi\Delta f \langle i_L \rangle_{1I} \\ -2\pi\Delta f \langle i_L \rangle_{1R} \end{bmatrix} \cdot f_m \quad (6)$$

$$Y = \begin{bmatrix} k_1 & -\frac{4k_2 \sin D\pi}{\pi} & -\frac{4k_2 \cos D\pi}{\pi} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \langle v_o \rangle_0 & \langle i_L \rangle_{1R} & \langle i_L \rangle_{1I} \end{bmatrix}^T$$

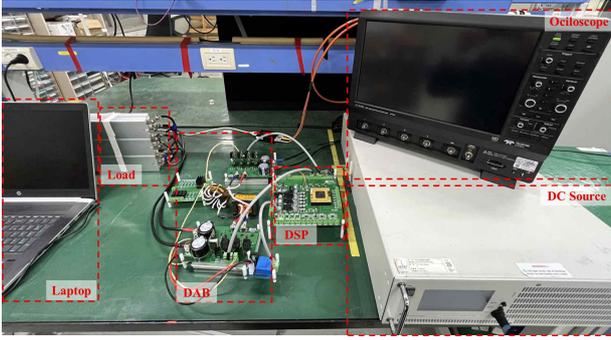


그림 3 3.3 kW SSM-DAB 시제품 실험 환경  
Fig. 3 3.3 kW SSM-DAB Prototype Experimental Environment

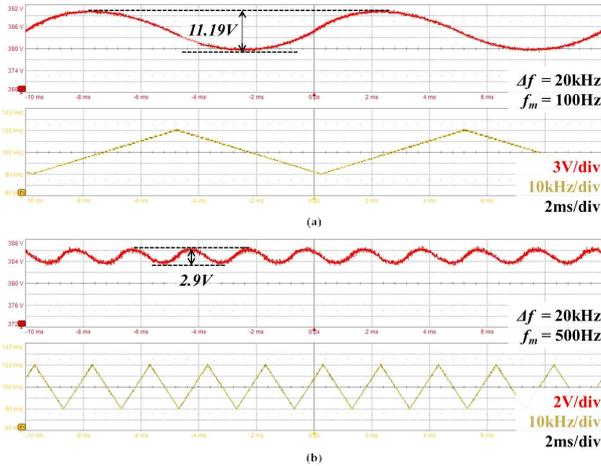


그림 4 개루프에서의 SSM-DAB 출력전압 및 주파수 변동  
(a)  $\Delta f = 20kHz, f_m = 100Hz$  (b)  $\Delta f = 20kHz, f_m = 500Hz$   
Fig. 4 SSM-DAB output voltage and frequency variations in open loop  
(a)  $\Delta f = 20kHz, f_m = 100Hz$  (b)  $\Delta f = 20kHz, f_m = 500Hz$

표 1 실험 및 모델링에 적용된 DAB 설계값  
Table 1 DAB design values applied in experiments and modeling

$V_s, V_o$	380 V	$N_p : N_s$	1 : 1
$L$	40 $\mu H$	$C_p, C_s$	440 $\mu F$
$f_s$	100 kHz	$\Delta f$	20 kHz
$P_o$	3.3 kW	$R_o$	43.7 $\Omega$

### 3. 실험

SSM로 인한 동작주파수 변화에 대한 소신호 모델을 실제 실험에서 검증하기 위해 그림 3의 실험 환경에서 DAB 컨버터 3.3kW의 시제품을 사용하였다. 소신호 모델은 개루프 상태의 DAB를 모델링했기 때문에 개루프에서 실험을 진행하였다.  $\Delta f = 20kHz, f_m = 100Hz, m_f = 200$  과  $\Delta f = 20kHz, f_m = 500Hz, m_f = 40$  두 가지 경우에서 실험을 진행하였다. 각각의 실험 파형을 그림 4에 나타냈다.  $f_m = 100Hz$ 인 경우 출력전압의 첨두치 진폭이 11.19 V 즉, 5.6 V의 진폭을 가진다. 주파수 변조 파형과 출력전압 리플 사이의 위상차는  $-260.5^\circ$  이다,  $f_m = 500Hz$ 은 1.45 V의 진폭과  $-252.7^\circ$ 의 위상차를 가

진다. 소신호 모델 결과와 오차를 표 2에 나타냈다. 측정 오차의 요인에는 전원의 출력임피던스, DAB의 기생성분, 정현파가 아닌 삼각형 변조에 의한 오차로 인해 나타난다. 출력전압 리플의 크기와 위상차를 통해 실험 결과가 소신호 모델링의 결과를 반영함을 알 수 있다.

표 2 소신호 모델과 실험 결과 비교 표  
Table 2 Table comparing small-signal model and experimental results

		$\Delta f : 20kHz$ $f_m : 100Hz$	$\Delta f : 20kHz$ $f_m : 500Hz$
Small-Signal model	Mag	6.02 V	1.24 V
	Phase	$-262^\circ$	$-256^\circ$
Experiment	Mag	5.6 V	1.45 V
	Phase	$-260.5^\circ$	$-252.7^\circ$
Error	Mag	7%	14.5%
	Phase	0.6%	1.3%

### 4. 결론

본 논문에서는 SSM이 적용된 DAB를 소신호 모델을 이용하여 SSM으로 인한 출력전압 리플에 대해 분석하였다. SSM은 동작주파수를 변동하여 EMI를 줄일 수 있으나 DAB컨버터에서는 동작주파수 변동으로 인한 출력전압 리플이 발생한다. 동작주파수 변동에 따른 출력전압 리플을 분석하기 위해 소신호 모델을 이용하였고, 모델을 검증하기 위해서 3.3 kW의 DAB를 개루프에서 실험하여 모델의 정확성을 검증하였다. 후속 연구에서 동작주파수 변화에 대한 소신호 모델을 이용하여 SSM으로 인한 리플을 효과적으로 저감할 수 있는 제어기를 설계할 예정이다.

이 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (2022202090010B, 산업체 최적 전압관리를 위한 제어설비 기술개발 및 실증)

### 참고 문헌

- [1] F. Pareschi, R. Rovatti and G. Setti, "EMI Reduction via Spread Spectrum in DC/DC Converters: State of the Art, Optimization, and Tradeoffs," in IEEE Access, vol. 3, pp. 2857-2874, 2015.
- [2] R. Redl, "Electromagnetic environmental impact of power electronics equipment," in Proceedings of the IEEE, vol. 89, no. 6, pp. 926-938, June 2001.
- [3] K. Mainali and R. Oruganti, "Conducted EMI Mitigation Techniques for Switch-Mode Power Converters: A Survey," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 25, no. 9, pp. 2344-2356, Sept. 2010.
- [4] 정지훈, 김민아. (2021). 전력전자와 Spread Spectrum. 전력전자학회지, 26(2), 56-61.
- [5] H. Qin and J. W. Kimball, "Generalized Average Modeling of Dual Active Bridge DC-DC Converter," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 4, pp. 2078-2084, April 2012,