

DC-DC Dual Active Bridge 컨버터의 소신호 모델을 이용한 전달함수 분석과 제어기 설계에 관한 연구

이원빈, 최현준, 정지훈
울산과학기술원(유니스트)

Study on Controller Design and Analysis of Dual Active Bridge Converter Using Small Signal Model

Won -Bin Lee, Hyun-Jun Choi, and Jee-Hoon Jung

Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)

ABSTRACT

본 논문에서는 지능형 반도체 변압기를 구성하는 양방향 DC-DC Dual Active Bridge(DAB) 컨버터의 소신호 모델과 전달함수의 분석을 통해 컨버터의 안정도와 동작 특성을 파악하고, 이를 통해 동 특성 및 정상상태의 안정성을 향상시킬 수 있는 제어기 설계 방안을 제안한다.

1. 서론

최근 DC Microgrid(MG)에 대한 관심이 전 세계적으로 높아지고 있고, 많은 연구가 진행 중에 있다. DC MG는 DC 배전을 통해 전력 전송 효율을 높이고, 신재생 에너지와의 연결이 용이하다는 장점이 있다. DC MG의 핵심 구성 요소인 지능형 반도체 변압기는 AC-DC, DC-DC, DC-AC 컨버터로 구성되어 있다. DC-DC 컨버터 부분은 양방향 전력 전송을 위해서 양방향 컨버터로 구성되어야 한다. 다양한 양방향 토폴로지 중에서 DAB 컨버터는 위상 차이만을 이용하여 제어가 용이하고, 스위치의 소프트 스위칭이 가능하다는 장점으로 인해 널리 사용된다. 따라서 본 논문에서는 DAB 컨버터의 안정적인 동작을 위해 소신호 모델의 분석을 통해 적절한 제어기를 설계하고자 한다.

2. Dual Active Bridge(DAB) 컨버터

2.1절 DAB 컨버터의 동작 원리

DAB 컨버터는 대전력 DC-DC 컨버터를 위한 대안으로써 제안되었다. 그림 1은 양방향 DC-DC DAB 컨버터를 나타낸다. DAB 컨버터는 풀-브릿지 회로를 변압기의 1차측과 2차측에 사용하여 동작시킬 수 있다. 그림 1의 변압기 양단 전압의 위상 차에 따라서 전력 전달이 이루어진다.

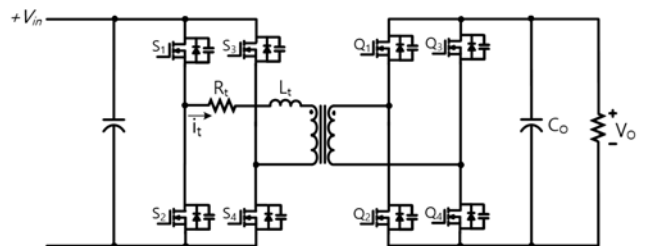


그림 1 양방향 DC-DC DAB 컨버터
Fig. 1 Schematic of DC-DC DAB Converter

2.2절 DAB 컨버터의 소신호 모델 분석

소신호 모델을 유도할 때 사용된 상태 변수는 출력 커패시터의 전압과 인덕터의 전류이다. 하지만 DAB 컨버터의 인덕터 파형은 주기를 가지는 AC와 같다. 따라서 평균을 적용하면 0이 되어 기존에 사용되던 상태 공간 평균법(SSA)을 적용함에 있어 제한적이다.^[1] 여기에서는 일반화된 평균화 모델링 기법을 이용함으로써, DAB 컨버터의 소신호 모델링을 하고자 한다. 그림 1로부터 식 (1), (2)의 미분방정식을 유도할 수 있다. 식 (1), (2)의 S1과 S2는 변압기 양단의 전압과 전류에 대하여 정규화하여 -1에서 1을 가지는 사각파형을 나타낸다.

$$\frac{di_l(\tau)}{d\tau} = -\frac{R_l}{L_l}i_l(\tau) + \frac{s_1(\tau)}{L_l}v_l(\tau) - \frac{s_2}{L_l}v_o(\tau) \quad (1)$$

$$\frac{dv_o(\tau)}{d\tau} = -\frac{1}{RC_o}v_o(\tau) + \frac{s_2(\tau)}{C_o}i_l(\tau) \quad (2)$$

(1), (2)의 각 방정식에 푸리에 급수의 미분 특성과 곱의 특성을 적용하여 0차와 1차식을 구하여 행렬식을 정리하면 (3)와 같다.^[1]

$$\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} \Delta v_o^0 \\ \Delta i_l^0 \\ \Delta i_l^1 \\ \Delta i_l^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -4\sin(D\pi) & -4\cos(D\pi) \\ RC_o & \pi C_o & \pi C_o \\ 2\sin(D\pi) & -R_l & \\ \pi L_l & L_l & \\ 2\cos(D\pi) & -\omega_l & -R_l \\ \pi L_l & L_l & L_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v_o^0 \\ \Delta i_l^0 \\ \Delta i_l^1 \\ \Delta i_l^1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{4}{C_o}(I_{l1}^1 \sin(\pi D) - I_{l1}^2 \cos(\pi D)) \\ \frac{2}{L_l}V_o^0 \cos(\pi D) \\ -\frac{2}{L_l}V_o^0 \sin(\pi D) \end{bmatrix} \Delta d \quad (3)$$

2.3절 모델 분석과 제어기 설계

제안하는 제어기는 산업현장에서 주로 사용되는 PI 제어기를 사용하였다. 산업체에서 제어기를 설계함에 있어 정확한 설계값을 이용하는 것보다 시행착오법을 활용하는 경우가 일반적이다. 그에 따라 기존의 설계 방법으로부터 벗어나 제어기를 설계함으로써 동 특성과 정상 상태의 좀 더 안정적인 확보가 필요하다.

그림 3은 표 1의 설계 값들을 (3)에 적용하여 MATLAB을 통해 이론 분석을 진행한 파형과 PSIM을 통해 모의시험을 진행한 파형을 MATLAB에서 그린 비교 파형을 나타낸다. Bode Plot에 따르면 저주파에서 시스템의 Single Pole이 나타나고, 스위칭 주파수에서 Double Pole이 나타나며, 곧이어 Double Zero의 영향이 나타난다. 그에 따라 적절한 주파수 범위에서 교차주파수를 설계함으로써, 고주파에서 나타나는 시스템 Double Pole과 Double Zero의 영향을 감소하고자 하였다.

그림 4는 기존의 시행착오법에 의해 설계된 제어기의 출력전압 파형과 Bode Plot의 분석을 통해 설계된 출력전압 파형을 PSIM을 통해 모의시험을 진행한 비교 파형을 나타낸다. 설계된 제어기에서는 기존의 제어기에 비해 %오버슈트를 줄였고, 정착 시간을 향상시키며, 정상상태 오차를 줄이도록 설계하였다. PI 제어기의 설계 값은 표 1의 마지막 행에 표시해 두었다. 표 2는 기존의 제어기와 설계된 제어기의 %오버슈트, 정착 시간, 정상상태 오차, 이득 여유, 위상 여유, 교차 주파수를 비교한 값이다. 설계된 제어기에서는 기존의 제어기에 비해 %오버슈트는 3.68%에서 3.15%로 감소했고, 정착 시간은 기존의 제어기 설계 방법에 비해 3.6msec 향상되었음을 알 수 있다. 또한, 정상상태 오차는 기존의 6.8V에서 0.07V로 감소하였다. 교차 주파수는 기존 대비 300 Hz가 감소하여 이득 여유와 위상 여유가 각각 11dB와 9°만큼 향상되었다.

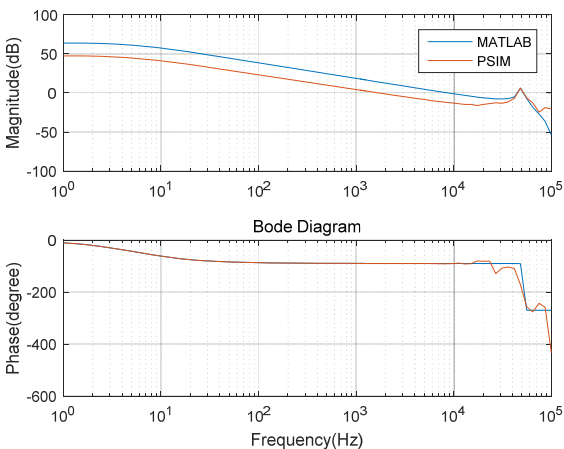


그림 3 DAB 컨버터의 소신호 모델의 Bode Plot
Fig. 3 Bode Plot of Small Signal Model for DAB Converter

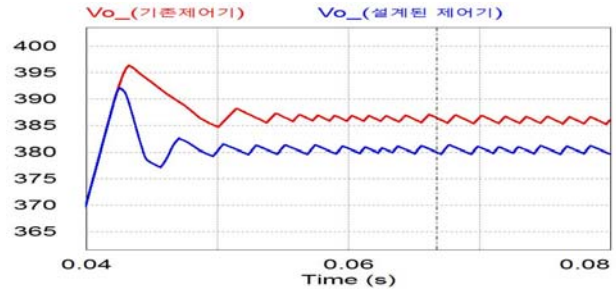


그림 4 PSIM 시뮬레이션 결과 파형
Fig. 4 The Result Waveform of PSIM Simulation

표 1 DAB 컨버터에 적용된 설계 매개변수

Table 1 Design Parameters of DAB Converter

V_i, V_o	380 V	L_t	109.4 μ H
C_o	680 μ F	f_s	50 kHz
R_L	43.76 Ω	R_t	0.01 Ω
N_2/N_1	1	P_o	3.3 kW
K_p	7.2	K_i	10.5

표 2 기존 제어기와 설계된 제어기의 동 특성 비교

Table 2 Dynamic Comparison between Previous and Designed Controller

	기존 제어기	설계된 제어기
%오버슈트	3.68 %	3.15 %
정착 시간	48.6 msec	45 msec
정상상태 오차	6.8 V	0.07 V
이득 여유(G.M)	4 dB	15 dB
위상 여유(P.M)	30°	39°
교차 주파수	1.2 kHz	0.9 kHz

3. 결론

본 논문에서는 지능형 반도체 변압기의 구성 요소 중 양방향 DC-DC 컨버터로 사용된 DAB 컨버터에 일반화된 평균화 모델링 기법을 적용하여 소신호 모델 분석을 통한 보다 기존의 제어기에 비해 안정적인 제어기 설계방법을 제안하고자 하였다. 제어기의 안정성을 확보하기 위한 제어기 설계 방법을 제시하였고, 이론 및 시뮬레이션 결과를 통해 제안하는 제어기의 설계 방법과 타당성을 검증하였다.

이 논문은 한국전력공사 전력연구원에서 수행중인 “저압직류배전망 독립성 실증 연구” 과제의 지원을 받아 수행한 연구과제임 (D3080)

참고 문헌

[1] Hengsi Qin “Generalized Average Modeling of Active Bridge DC-DC Converter” IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, Vol 27, No. 4, APRIL 2012