

대역폭 확산 변조 기법을 활용해 통신 기능과 EMI 저감 성능을 갖는 Dual Active Bridge Converter

이준석, 정권교, 정지훈
울산과학기술원

Talkative Dual Active Bridge Converter Employing Spread Spectrum Modulation to Mitigate EMI

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

ABSTRACT

본 논문은 동작 주파수를 대역폭 확산 변조 기법 (Spread Spectrum Modulation; SSM)을 활용한 통신 기능을 갖는 Dual Active Bridge (DAB) 컨버터를 제안한다. 최근 AC 배전망의 확장과 DC 배전의 발달로 전력선을 이용한 통신이 필수적이다. 기존의 전력선 통신(Power Line Communication; PLC)과 같은 방법은 전력선에 존재하는 고조파의 영향으로 통신 성능이 떨어지고 별도의 송, 수신 장치가 필요한 문제가 있다. 본 논문에서는 직류 그리드에서 전력을 제어하는 DAB 컨버터에서 SSM을 이용하여 컨버터의 출력 전압의 변동으로 데이터를 전송하는 기술을 제안한다. 제안하는 기술은 별도의 송, 수신 장치가 필요 없으며, 컨버터의 고속 스위칭으로 인한 전자기 노이즈를 SSM을 통해 저감할 수 있다. 제안하는 통신 기능을 갖는 DAB 컨버터는 1-kW급 프로토타입을 통해 효율성과 타당성을 검증한다.

1. 서론

수 년 동안 직류 분산 전원을 기반으로 하는 전력 시스템이 널리 보급되고 있다.^[1] [1]에서 스마트 그리드, 스마트 시티 및 기타 분야에서 DC 마이크로그리드 (DCMG)의 개발이 가속화되고 있다. 이러한 스마트 DCMG를 위해 전력선 통신 (Power Line Communication; PLC)와 무선 정보 전력 전송 (Simultaneous Wireless Information Power Transfer; SWIPT)이 연구되고 있다. 하지만, PLC와 SWIPT는 송수신을 위해 별도의 신호 처리 장치가 필요하여 많은 비용이 발생하고 전력선에 존재하는 노이즈에 취약하다는 문제가 있다.

대화형 전력변환장치 (Talkative Power Converter; TPC)는 기존의 PLC와 SWIPT의 문제점을 해결하기 위해 연구되고 있다.^[2] TPC는 전력변환장치를 이용하여 입력 또는 출력 전압, 전류를 이용하여 별도의 신호 처리 장치 없이 DCMG에서 통신이 가능하다. 최근 출력 전압의 주파수 성분을 이용한 주파수 변조 기법 (Frequency Shift Keying; FSK), PWM의 위상 또는 출력 전압의 위상을 이용한 위상

변조 기법 (Phase Shift Keying; PSK), 출력 전압의 크기를 이용한 크기 변조 기법 (Amplitude Shift Keying; ASK)와 같은 방식의 통신 기법을 이용한 TPC들이 연구되고 있다. 하지만, 기존의 TPC들은 모두 DCMG의 전자파 간섭을 고려하지 않고 통신 기능에만 초점을 맞춰 동작한다. 따라서 전자파 간섭을 저감하고 전력변환장치의 신뢰성을 올리며 통신 성능이 높은 TPC가 필요하다.

고속 스위칭으로 전력을 전달하는 전력변환장치는 전자파간섭의 감소는 필수적이다. 따라서 대부분의 전력변환장치의 입력 측에 EMI 필터가 연결된다. EMI 필터는 전력변환장치의 전력밀도를 감소시키고 비용 증가를 야기한다. 이러한 EMI 필터의 크기를 줄여 비용 저감과 전력밀도 상승을 위해 대역폭 확산 변조기법 (Spread Spectrum Modulation; SSM)이 제안되었다.^[3] SSM은 전력변환장치의 동작 주파수를 주기적으로 변경하여 전력을 전달하는 스위칭 기법이다.

본 논문에서 DCMG에서의 전력변환장치의 EMI를 저감하며 통신 기능을 갖는 Dual Active Bridge (DAB) 컨버터를 제안한다. DAB 컨버터의 SSM 동작을 통해 원하는 데이터를 출력 전압 리플 주파수로 변조하여 통신을 달성한다. 제안하는 TPC-DAB 컨버터는 1-kW급 프로토타입을 통해 효율성과 타당성을 검증한다.

2. Spread Spectrum Modulation으로 동작하는 Dual Active Bridge 컨버터의 설계

제안하는 TPC-DAB 컨버터는 그림 1과 같이 DAB 컨버터를 이용하여 DCMG에서의 통신 기능을 갖는 전력변환장치의 동작을 수행한다. 또한, DAB 컨버터의 출력 전압과 전력은 식(1), (2)와 같이 표현된다.

$$V_2 = \frac{nV_1}{2f_{sw}L_{lk}} R_L \phi_1 (1 - \phi_1) \quad (1)$$

$$P_{Transfer} = \frac{nV_1}{2f_{sw}L_{lk}} \phi_1 (1 - \phi_1) \quad (2)$$

여기서 n 은 DAB 컨버터의 변압기 턴 비, f_{sw} 는 동작 주파수, L_{lk} 는 직렬 인덕턴스, R_L 은 부하 저항, ϕ_1 은 각 브릿지 사이의 위상 차이를 의미한다. DAB

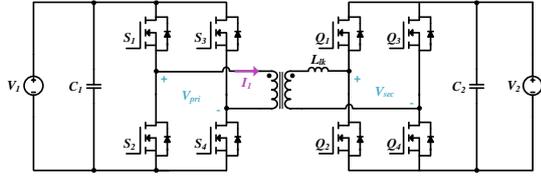


그림 1 Dual active bridge converter 회로도
Fig. 1 Schematic of the dual active bridge converter

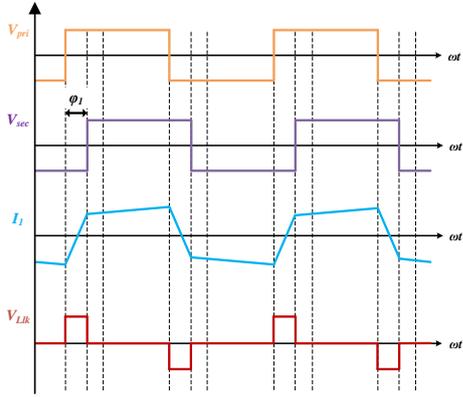


그림 2 위상천이변조 기법으로 동작하는 DAB 컨버터 파형
Fig. 2 Theoretical waveforms of the phase shift modulation operation in the DAB converter

컨버터는 그림 2와 위상 천이 변조 기법 (Phase Shift Modulation; PSM)을 이용하여 ϕ_1 만큼 L_{lk} 에 에너지를 저장하고 전력을 전달한다. 따라서 DAB 컨버터는 다른 양방향 토폴로지에 비해 빠른 전력 방향 전환이 가능하고 영-전압 스위칭 (Zero Voltage Switching; ZVS)를 통해 정격 부하에서 높은 효율을 달성할 수 있다.

SSM을 통해 전력변환장치의 고속 스위칭으로 발생하는 EMI의 침투치를 저감하여 DCMG의 전자파 간섭을 억제할 수 있다. 식 (3)에 따르면 SSM을 통한 EMI 침투치의 저감 성능은 동작 주파수의 변화량 (Δf)과 변화 주기 (f_m)에 의해 결정된다.

$$s(t) = A_o \cos\left(2\pi f_c t + 2\pi \Delta f \int_{-\infty}^t \xi(\tau) d\tau\right) \quad (3)$$

여기서 A_o 는 신호의 크기, f_c 는 동작 주파수, $\xi(\tau)$ ($-1 \leq \xi(\tau) \leq 1$)는 동작 주파수의 변조 패턴을 의미한다. 따라서 주기성 SSM 동작에서 Δf 와 f_m 의 비에 의해 EMI 저감 성능이 결정된다

SSM을 통해 통신 기능을 갖는 DAB 컨버터는 식 (4)과 같이 동작 주파수의 변동을 고려한 L_{lk} 의 설계가 요구된다.

$$\Delta L_{lk} = \frac{2\pi^2 R_L \phi_1 (1 - \phi_1) \Delta f}{\omega_{\min} \omega_{\max}} \quad (4)$$

여기서 ΔL_{lk} 는 동작 주파수 변동에 따른 인덕턴스의 변화이고, ω_{\min} 과 ω_{\max} 는 각각 최소 각주파수와 최대 각주파수를 의미한다. 따라서 식 (4)에 의해 계산된 최대 동작 주파수에서의 L_{lk} 로 설계하여 DAB 컨버터를 동작시킨다.

2. 제안하는 TPC-DAB 컨버터

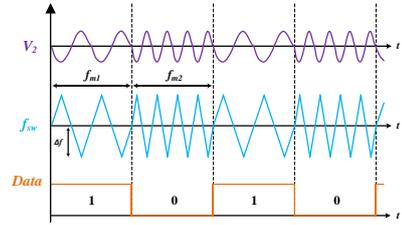


그림 3 제안하는 SSM을 이용한 TPC-DAB 컨버터의 통신 방법
Fig. 3 Proposed communication method using the SSM in the TPC-DAB

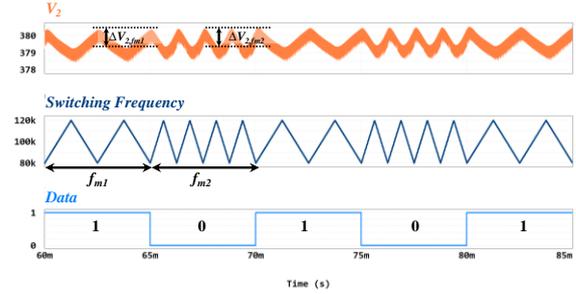


그림 4 제안하는 TPC-DAB의 시뮬레이션 과정
Fig. 4 Simulation results for the proposed method

표 1 TPC-DAB의 설계 사양

Table 1 Design parameters of the TPC-DAB

	Parameter	Value
V_{in}	입력 전압	380 V
V_o	출력 전압	380 V
L_{lk}	직렬 인덕턴스	43 uH
Δf	주파수 변동폭	10 kHz
f_{m1}, f_{m2}	주파수 변동 주기	400 Hz, 800 Hz
f_c	중심 주파수	100 kHz
C_1, C_2	입, 출력 캐패시턴스	200 uF
P_o	출력 전력	1 kW

제안하는 SSM을 통해 통신 기능을 갖는 DAB 컨버터는 그림 3과 같이 0과 1 두 가지의 데이터를 변조하는 BPSK를 이용한다. 데이터 전송을 위해 SSM에 의한 DAB 컨버터의 출력 전압 리플 (ΔV_{SSM})은 식 (5)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta V_{SSM} = \frac{2\pi^2 V_o \phi_1 (1 - \phi_1) \Delta f}{L_{lk, \max} \omega_{\min} \omega_{\max}} \quad (5)$$

따라서 제안하는 TPC-DAB의 데이터 전송은 서로 다른 SSM 변조 주파수 f_{m1} 과 f_{m2} 로 설계되어 수행한다. 그림 3과 같이 두 가지 f_m 을 이용하여 서로 다른 주파수의 출력 전압 리플을 복조하여 데이터를 전송한다. 그림 4는 SSM을 이용한 통신 기능을 갖는 DAB 컨버터의 모의실험 결과를 보인다. 모의실험은 표 1의 값으로 진행하였다. 먼저, f_{m1} 과 f_{m2} 를 각각 400 Hz와 800 Hz로 설계하였다. f_m 이 400 Hz일 때 출력 전압 리플은 1.43 V이고, 800 Hz일 때 0.88 V로 확인된다.

3. 실험 결과

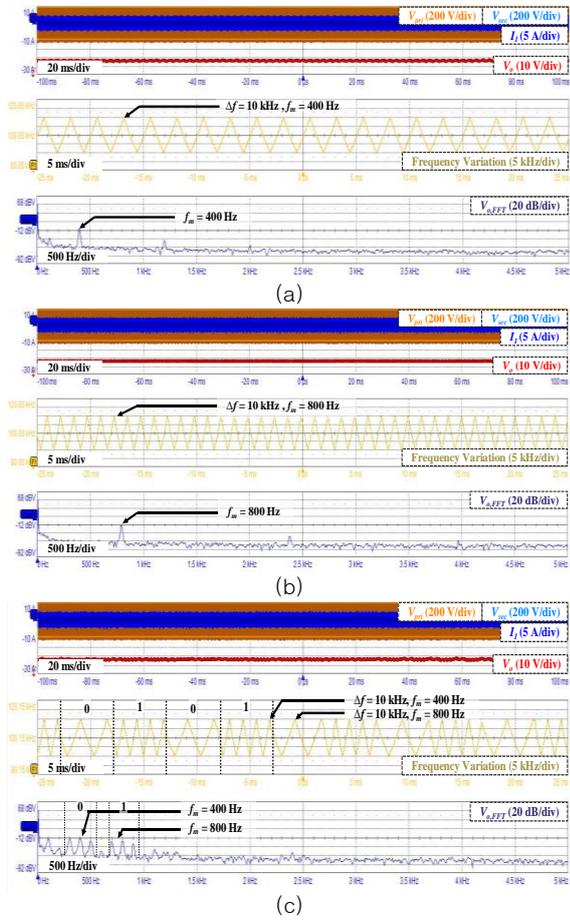


그림 5 제안하는 TPC-DAB 동작 실험 파형: (a) $f_m=400$ Hz, (b) $f_m=800$ Hz, (c) 제안하는 TPC-DAB
 Fig. 5 Experimental waveforms of the proposed TPC-DAB operation: (a) $f_m=400$ Hz, (b) $f_m=800$ Hz, (c) The proposed TPC-DAB

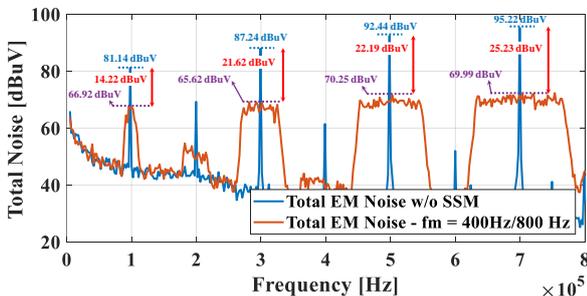


그림 6 EMI 저감 성능 측정 결과
 Fig. 6 Experimental measurements of EMI reduction performance

본 논문에서 제안하는 TPC-DAB 컨버터의 프로토타입은 TMS320F28379D (TI)을 사용하여 구현된다. EMI 측정은 line filter, LISN, 스펙트럼 분석기, CM/DM 분리기로 구성된다. 그림 5는 서로 다른 f_m 으로 동작하는 TPC-DAB의 동작 파형과 동작 주파수 변동 파형을 보인다. 200 bps의 통신 속도를 위해 Δf 는 10 kHz, f_m 은 400 Hz, 800 Hz로

모의실험과 동일한 설계로 실험을 진행했다. 그림 5(a)와 5(b)는 각각 f_m 이 400 Hz, 800 Hz일 때의 동작을 보인다. 출력 전압은 f_m 이 400 Hz로 동작할 때 1.6 V로 측정되고 800 Hz일 때 0.92 V로 측정된다. 그림 5(c)는 제안하는 TPC-DAB의 동작을 보인다. 데이터는 BFSK로 변조되어 각 f_m 에 의한 출력 전압 리플의 주파수를 이용한다. 데이터는 200 bps의 속도로 전송되는 상황을 모사하였다. 출력 전압의 FFT 결과로 400 Hz와 800 Hz 구간의 성분을 확인할 수 있다. 400 Hz에서 -14.2 dBV, 800 Hz에서 -11.8 dBV가 측정된다. 또한, 그림 6과 같이 SSM에 의한 EMI 저감도 확인할 수 있다. 먼저 고정 주파수로 동작할 때 100 kHz 대역의 EMI는 81.13 dBuV로 측정되고, SSM을 통한 12.22 dBuV 감소한 66.82 dBuV로 측정된 것을 볼 수 있다. 따라서 각 고주파에서 SSM에 의해 EMI는 최대 25.23 dBuV 감소한다.

4. 결론

본 논문에서 전력변환장치의 EMI를 줄이기 위해 SSM을 사용하는 DCMG의 TPC-DAB를 제안한다. 또한 동작 주파수 변동에 대한 전력변환장치의 신뢰성과 안정성을 보장하기 위한 설계 방법론을 제안한다. 제안된 방법은 SSM을 활용하여 전력변환장치의 EMI를 줄이고 DCMG에서 통신을 달성한다. 제안된 TPC-DAB는 1 kW 프로토타입을 사용하여 각각 400 Hz와 800 Hz의 f_m 을 구분하는 BFSK 변조를 사용하여 데이터를 전송한다. 통신속도는 200 bps로 동작하며 추가 연구를 통해 통신 속도를 높일 수 있다. 제안한 방법의 EMI 저감 성능은 고정 주파수 동작에 비해 약 25.93 dBuV 감소된다.

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2023-00219443)

참고문헌

- [1] I. Mandourakis, E. Koutroulis, and G. N. Karystinos, "Power Line Communication Method for the Simultaneous Transmission of Power and Digital Data by Cascaded H-Bridge Converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, no. 10, pp. 12793-12804, Oct, 2022.
- [2] M. Liserre, H. Beiranvand, Y. Leng *et al.*, "Overview of Talkative Power Conversion Technologies," *IEEE Open Journal of Power Electronics*, vol. 4, pp. 67-80, 2023.
- [3] F. Pareschi, G. Setti, R. Rovatti and G. Frattini, "Practical Optimization of EMI Reduction in Spread Spectrum Clock Generators With Application to Switching DC/DC Converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 9, pp. 4646-4657, Sept. 2014.