

듀얼 액티브 브릿지 컨버터의 과도응답 개선을 위한 모델 예측 위상 천이 제어

남은택, 채수용
포항공과대학교

Model Predictive Phase Shift Control of Dual Active Bridge Converters to Improve Transient Response Performance

Euntaek Nam, Suyong Chae
Pohang University of Science and Technology

ABSTRACT

본 논문은 DAB (Dual Active Bridge) 컨버터의 출력 전압 제어를 위해 새로운 모델 예측 위상 천이 제어(MP-PSC) 알고리즘을 제안한다. 기존의 DAB 컨버터를 위한 MPC (Model Predictive Control) 방법은 기존 위상에 적응형 매개변수를 추가하여 여러 위상 천이 후보군에 대해 최적 제어를 수행한다. 하지만, 정확한 전압 제어를 위해서 매개변수와 위상 천이 후보군의 범위 선정으로 인해 MPC 설계가 어려워지는 문제점이 있다. 제안한 방법은 MPC 비용함수의 변화를 최소화하여 출력 전압의 오차를 최소화하고 과도구간에서 빠르고 안정적인 동적 성능을 만족한다. 제안하는 MPC 알고리즘의 동적 응답 성능과 ZVS (Zero Voltage Switching) 특성은 시뮬레이션 시험을 통해 검증하였다.

1. 서론

DAB (Dual Active Bridge) 컨버터는 절연형 구조, 양방향 전력전달, 넓은 입/출력 전압 범위 및 ZVS (Zero Voltage Switching)를 통해 높은 전력 밀도를 달성할 수 있어 다양한 응용 분야의 전력 시스템에 사용되고 있다.^[1] DAB 컨버터의 안정적인 동작을 보장하기 위해서는 전압과 부하 변동 시 ZVS를 만족하며 빠른 제어 성능을 달성해야 한다.

MPC (Model Predictive Control)는 시스템 모델을 활용하여 미래 동작을 예측하고 비용함수를 평가하는 강인한 제어방법이다. MPC는 직관적인 설계와 빠른 동적 응답 및 다중 목표 제어가 가능하다는 점에서 전력 컨버터 제어에 널리 사용되고 있다. 기존 연구에서 제안된 MDCS(Moving Discretized Control Set)-MPC는 DAB 컨버터의 전압 제어를 위해 위상 천이 후보군을 선정하여 비용함수를 평가한다.^[2] MDCS-MPC는 이전 샘플링 주기에 적용된 위상을 기준으로 일정한 간격의 위상 천이를 선정함으로써 미래 동작을 예측하여 빠른 동적 성능을 달성할 수 있다. 하지만, 출력 전압 오차에 따른 적응형 매개변수와 후보 위상 천이의 범위 선정은 MPC의 복잡성과 연산량을 증가시킬 수 있다.

본 연구에서는 입력전압 또는 부하전류 변동 시 시스템의 동적 성능과 안정성을 향상시키기 위해 새로운 모델 예측 위상 천이 제어 (MP-PSC)를 제안한다. 제안하는 방법은 출력 전압에 대한 비용함수 변화를 최소화하여 비용함수 평가를 위한 루프와 복잡한 연산을 최소화한다. 제안하는 방법의 동적 성능과 ZVS는 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

2. 본론

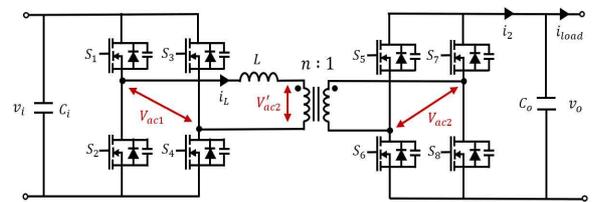


그림.1 DAB (Dual Active Bridge) 컨버터 토폴로지
Fig.1 Topology of Dual Active Bridge Converter

2.1 DAB 컨버터 모델링

DAB 컨버터는 그림 1과 같이 절연형 변압기를 기준으로 양방향 대칭 구조로 구성되며, 두 개의 풀브릿지 회로는 스위칭 동작 시 1, 2차 측의 전압 위상차를 통해 전력을 전달한다. L 은 턴수비가 n 인 절연형 변압기의 누설 인덕턴스와 보조 인덕터의 합으로 구성되며, C_i 와 C_o 는 각각 입력과 출력단의 커패시터를 나타낸다. 스위칭 주기 내 2차 측으로 전달되는 평균 전력 $\langle p(t) \rangle_{T_s}$ 는 (1)과 같이 나타낼 수 있고, 이때 위상 천이는 $\varphi > 0$ 을 가정한다.^[3]

$$\langle p(t) \rangle_{T_s} = \frac{n \langle v_i(t) \rangle_{T_s} \langle v_o(t) \rangle_{T_s}}{2\pi^2 f_{sw} L} \varphi (\pi - \varphi) \quad (1)$$

$\langle v_i(t) \rangle_{T_s}$ 와 $\langle v_o(t) \rangle_{T_s}$ 은 각각 샘플링 주기 T_s 에 대한 입/출력 전압의 평균값을 의미하며, f_{sw} 는 스위칭 주파수를 의미한다.

DAB 컨버터의 전력 손실이 없다고 가정하면, 2차 측에 흐르는 전류 $\langle i_2(t) \rangle_{T_s}$ 는 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\langle i_2(t) \rangle_{T_s} = \frac{\langle p(t) \rangle_{T_s}}{\langle v_o(t) \rangle_{T_s}} = \frac{n \langle v_i(t) \rangle_{T_s}}{2\pi^2 f_{sw} L} \varphi (\pi - \varphi) \quad (2)$$

출력 전압 $\langle v_o(t) \rangle_{T_s}$ 의 평균 변화량은 (3)과 같이 나타낼 수 있고, $\langle i_{load}(t) \rangle_{T_s}$ 는 T_s 에 대한 부하전류의 평균값을 의미한다.

$$C_o \frac{d \langle v_o(t) \rangle_{T_s}}{dt} = \langle i_2(t) \rangle_{T_s} - \langle i_{load}(t) \rangle_{T_s} \quad (3)$$

2.2 제안하는 MP-PSC 알고리즘

본 연구에서 제안하는 MP-PSC는 MPC 알고리즘의 비용함수를 시스템 동작을 결정하는 위상 천이에 대해 도함수가 최소가 되게 만든다. MP-PSC의 비용함수 최소화 전략은 MPC의 복잡성을 감소시키며, DAB 컨버터의 전압 제어 시 기존의

MDCS-MPC 방법보다 더 적은 연산 부담이 발생한다. 식 (3)은 T_s 에 대해 오일러 방법에 근거하여 (4)와 같이 상태 공간 모델로 나타낼 수 있다. DAB 컨버터 제어의 안정도를 높이기 위해 부하조건 변동 시 전압 제어 성능을 향상시킬 수 있도록 칼만 필터를 이용하여 부하전류 $i_{load}(k)$ 를 추정한다.

$$v_o(k+1) = v_o(k) + \frac{nv_i(k)}{2\pi^2 f_{sw}^2 C_o L} \varphi(k)(\pi - \varphi(k)) - \frac{T_s}{C_o} i_{load}(k) \quad (4)$$

비용함수 J 는 기준 출력전압 $v_{ref}(k+1)$ 과 $k+1$ 시점에서의 전압 $v_o(k+1)$ 의 오차와 $k+1$ 시점과 k 시점의 전압 오차의 합으로 구성되며, (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$J = \|v_o(k+1) - v_{ref}(k+1)\|^2 + \|v_o(k+1) - v_o(k)\|^2 \quad (5)$$

비용함수 최소화 전략은 (6)과 같이 위상 천이 φ 에 대한 J 의 도함수를 0으로 만듦으로써 출력 전압 오차를 최소로 만드는 φ 를 매 샘플링 주기마다 계산한다.

$$\frac{dJ(\varphi)}{d\varphi} = 0 \quad (6)$$

그림 2의 블록 다이어그램은 본 연구에서 제안하는 MP-PSC 방법을 나타내며, 위상 천이 제어의 자유도를 높이기 위해 TPS (Triple Phase Shift) 변조 방법을 적용하였다.^[4]

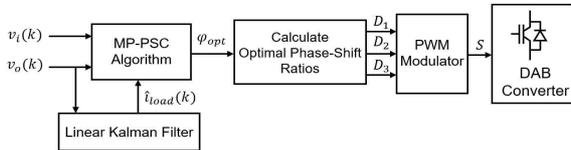


그림.2 제안하는 MP-PSC 제어도

Fig.2 Control scheme of the proposed MP-PSC

2.3 시뮬레이션 결과

제안하는 MP-PSC 방법의 동적 성능과 ZVS를 검증하기 위해 MATLAB/Simulink 소프트웨어를 활용하였고, 표 1은 시뮬레이션 파라미터를 나타낸다.

그림 3(a)는 입력전압과 부하전류 변동 조건에서의 출력 전압 v_o 을 나타낸다. 기존의 PI 제어, MDCS-MPC 방법과 비교 시 MP-PSC는 과도구간에서 빠르고 안정적인 동적 성능을 보이며, 출력 전압의 지령이 400V일 때 최대 2V 오차 이내에서 전압 제어가 유지된다. 그림 3(b)는 1, 2차측 전압과 인덕터 전류 i_L 를 나타내며, 스위칭 시 인덕터 전류 ZVS 특성을 확인할 수 있다.

표 1. 시스템 파라미터

Table 1. System parameter

Input Voltage	800 [V]
Switching Frequency	40 [kHz]
Inductor	100 [μ H]
Transformer Turn Ratio	1.5
Input Capacitor	500 [μ F]
Output Capacitor	500 [μ F]

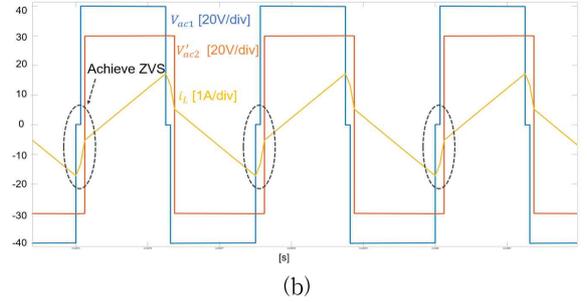
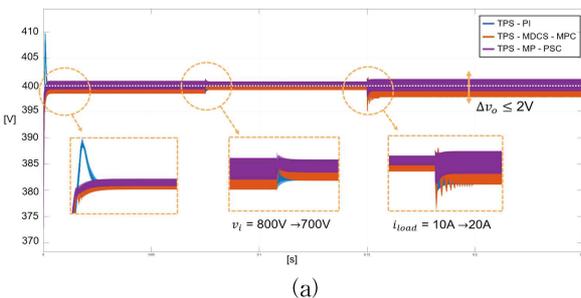


그림.3 DAB 컨버터 전압 제어 시뮬레이션 (a) $v_{ref}=400V$ 일 때 제어 성능 (b) ZVS 파형

Fig.3 Simulation Results of the Voltage Control of DAB Converter. (a) Control performance when $v_{ref}=400V$ (b) ZVS waveform

3. 결론

본 연구는 DAB 컨버터의 전압 제어를 위해 비용함수의 변화량을 최소화시키는 새로운 MPC 방법을 제안하였다. 제안하는 MP-PSC는 기존의 DAB 컨버터에 적용되는 MPC 방법과 달리 위상 천이 후보군을 사용하지 않고 비용함수의 도함수를 최소화시킴으로써 MPC 알고리즘의 복잡성과 연산량을 줄인다. 제안하는 방법은 디지털 컨트롤러의 연산 부담을 최소화할 수 있고, 다양한 전압과 전력 범위에서 빠르고 강인한 제어 성능을 기대할 수 있다.

이 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2023-00234707, 전력계통 안정화를 위한 연료전지 및 수전해 계통 연계 운영기술 개발)

참고 문헌

- [1] N. Hou and Y. W. Li, "Overview and Comparison of Modulation and Control Strategies for a Nonresonant Single-Phase Dual-Active-Bridge DC-DC Converter," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 35, no. 3, pp. 3148-3172, March 2020.
- [2] L. Chen, S. Shao, Q. Xiao, L. Tarisciotti, P. W. Wheeler and T. Dragičević, "Model Predictive Control for Dual-Active-Bridge Converters Supplying Pulsed Power Loads in Naval DC Micro-Grids," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 35, no. 2, pp. 1957-1966, Feb. 2020.
- [3] K. E. Lucas, D. J. Pagano and R. L. P. Medeiros, "Single Phase-Shift Control of DAB Converter using Robust Parametric Approach," 2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference, Santos, Brazil, 2019.
- [4] S. Shao, M. Jiang, W. Ye, Y. Li, J. Zhang and K. Sheng, "Optimal Phase-Shift Control to Minimize Reactive Power for a Dual Active Bridge DC-DC Converter," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 34, no. 10, pp. 10193-10205, Oct. 2019.