

Multi-Level NPC-Based Dual Active Bridge DC-DC Converter의 효율 개선을 위한 제어방법에 관한 연구

이준영, 최현준, 정지훈
울산과학기술원(UNIST)

Research on Control Method to Improve Power Conversion Efficiency of Multi-level NPC-Based Dual Active Bridge DC-DC Converter

Jun-young Lee, Hyun-Jun Choi, Jee-Hoon Jung
Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)

ABSTRACT

Multi-level Dual Active Bridge (ML-DAB) 컨버터는 높은 스위칭 패턴 자유도를 가져 인덕터 전류의 첨두치와 RMS를 효과적으로 감소시킬 수 있다. 본 논문에서 3-레벨 NPC DAB 컨버터의 동작원리를 분석하고, 비대칭적인 스위칭 패턴을 적용시켜 인덕터 전류의 첨두치를 수학적으로 분석하여 컨버터의 전력변환 효율을 높일 수 있는 동작점 설계 방법을 제안한다. 여러 동작점에 따른 전류 RMS 값을 비교하여 제안하는 동작점 설계 방법의 타당성을 검증하고자 한다.

1. 서론

최근 산업에서 고전압을 이용하는 사례가 많아지면서 스위치가 고전압을 견딜 수 있는 정격전압을 높이는 대신 멀티레벨 방식이 선호되고 있다. 3-레벨 NPC DAB 컨버터는 단일레벨 DAB 컨버터에 비해서 스위치 2개를 직렬로 연결하고 다이오드를 추가한 구조이다. 전류가 다이오드를 통해 흐르기에 전압에 레벨이 생기며 이는 인덕터에 걸리는 전압의 파형이 여러 개로 나뉘게 되고 전류는 정현파 형태에 가까워진다. 이를 조절하여 인덕터 전류의 RMS 와 THD를 감소시켜 높은 전력변환 효율을 얻는다.

본 논문에서는 3-레벨 NPC DAB 컨버터의 동작원리에 대해 분석하고 기존 대칭적인 3-레벨 컨버터의 스위칭 방식에 새로운 비대칭적인 스위칭 패턴을 적용하여 인덕터 전류의 첨두치와 RMS를 줄이는 방법에 대해 제안한다.

2. 3-레벨 NPC DAB 컨버터

3-레벨 NPC DAB 컨버터는 그림 1과 같이 1차측에는 NPC, 2차측에는 풀 브릿지를 선정함으로써 출력전압의 승강압이 가능하다. 3-레벨 NPC DAB 컨버터는 1차측 Sa1, Sa2, Sa3, Sa4, Sb1, Sb2, Sb3, Sb4, 2차측 S1, S2, S3, S4로 총 12개의 스위치와 변압기, 인덕터로 구성되어 있다. Sa1-Sa3, Sa2-Sa4, Sb1-Sb3, Sb2-Sb4, S1-S2, S3-S4는 서로 상보적으로 스위칭한다. 단일레벨 DAB 컨버터와 동일하게 변압기를 양단으로 1차측과 2차측 전압의 위상차 ϕ 로 에너지를 전달한다. 1차측에는 2차측과 달리 스위칭 패턴에 α 와 β 라는 자유도를 추가하였다.

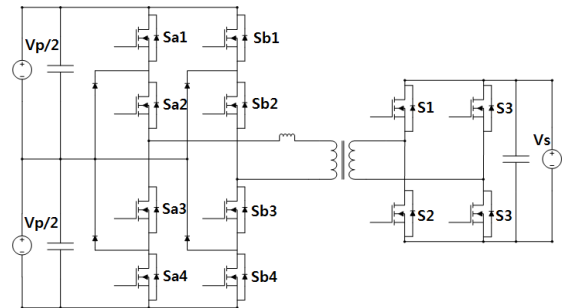


그림 1 DC-DC 3-레벨 NPC DAB 컨버터
Fig. 1 DC-DC 3-Level NPC DAB Converter

2.1 3-레벨 NPC DAB 컨버터의 동작원리

3-레벨 NPC DAB 컨버터는 그림2 에서와 같이 α, β 를 조정하여 2 혹은 3-레벨 이었던 전압이 5-레벨이 된다. 기존 단일 레벨 컨버터에 비해서 α 와 β 만큼 ϕ 를 기준으로 앞뒤로 파형에 변화가 생긴 것을 볼 수 있다. 이에 따라 인덕터 전류가 α 와 β 의 지연 이후 꺾이는 현상을 조절할 수 있고 전류의 첨두치와 RMS를 제어할 수 있다.

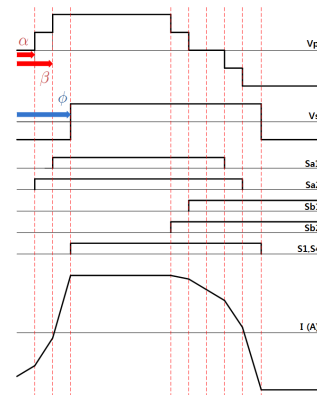


그림 2 대칭적인 스위칭 방식에서의 인덕터 전류 파형
Fig. 2 Symmetric Switching and Inductor Current Waveforms under Conventional Symmetric Switching Method

2.2 비대칭 스위칭 3-레벨 NPC DAB 컨버터

인덕터 전류의 첨두치와 RMS를 더 효율적으로 제어하기 위해 기존 3-레벨 NPC DAB 컨버터의 대칭적인 스위칭 방식 대신에 비대칭적인 스위칭 방식을 적용하였다. 아래 식 (1)과 (2)는 대칭적인 스위칭 방식에 따른 전류의 첨두치와 출력전력 공식이다.^[1]

$$i_L(0) = \frac{V_p}{nwL} \left(\frac{\pi}{2} - \phi \right) - \frac{V_s}{wL} \left(\frac{\pi}{2} \right) \dots (1)$$

$$P_o = \frac{V_p V_s}{nwL} \left(\phi - \frac{\phi^2}{\pi} - \frac{\alpha^2}{2\pi} - \frac{\beta^2}{2\pi} \right) \dots (2)$$

시작점을 기준으로 인덕터 전류가 α 와 β 만큼 앞뒤로 꺾인 기존의 방식과는 달리 비대칭적인 스위칭 방식은 뒤에서만 전류가 꺾이게끔 스위칭 한다. 따라서 도통 전류의 면적이 늘어나고 이는 동일 전력에서 전류의 첨두치를 줄이게 된다. 전류 첨두치의 감소는 수식(3), (4)와 그림 3을 통해 확인할 수 있다.

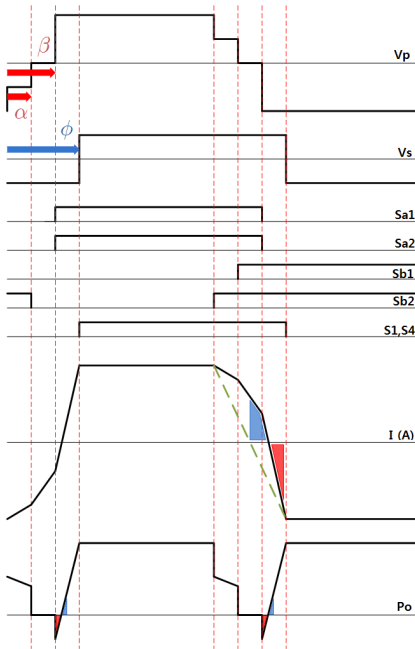


그림 3 비대칭적인 스위칭 방식에서의 인덕터 전류 및 전력 파형
Fig. 3 Inductor Current and Power Waveforms under Proposed Asymmetric Switching Method

$$i_L(0) = \frac{V_p}{nwL} \left(\frac{\pi}{2} - \phi \right) - \frac{V_s}{wL} \left(\frac{\pi}{2} \right) + \frac{V_p}{nwL} \left(\frac{\alpha}{4} + \frac{\beta}{2} \right) \dots (3)$$

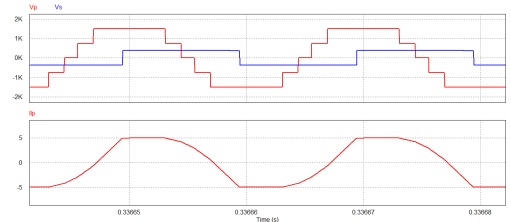
$$P_o = \frac{V_p V_s}{nwL} \left(\phi - \frac{\phi^2}{\pi} - \frac{\alpha^2}{4\pi} - \frac{\beta^2}{2\pi} + \frac{(\alpha + 2\beta)\phi}{2\pi} - \frac{\alpha + 2\beta}{4} \right) \dots (4)$$

식 (2)와 (4)에 의해 출력 전력에 α 와 β 의 변화가 반영되고 P_o 가 작아지면 인덕턴스가 작아지게 된다. 기존 3-레벨 NPC DAB 컨버터는 작아진 인덕턴스의 영향으로 전류의 첨두치가 커짐을 식 (1)에서 확인할 수 있다. 하지만 비대칭적인 스위칭 방식의 3-레벨 NPC DAB의 경우 식 (3)을 통해 인덕턴스가

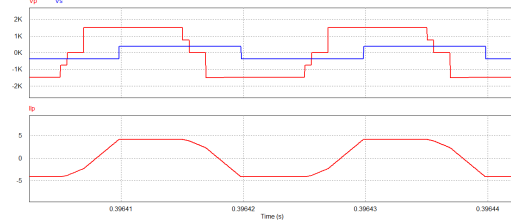
작아져도 α 와 β 가 줄어든 인덕턴스의 효과를 보상해주어 전류의 첨두치가 감소하는 경향이 확인된다.

2.3 시뮬레이션

그림 4에서 PSIM을 사용하여 1500_V to 380_V, 3.8_kW에서 α 와 β 는 $0.056\pi(10^\circ)$, $0.194\pi(35^\circ)$ 로 고정하고 대칭적인 스위칭 방식과 비대칭적인 스위칭 방식의 성능을 비교하였다. 여기서 비대칭적인 스위칭 방식의 경우 전류의 RMS가 3.51A로 대칭적인 스위칭 방식(3.93_A)보다 약 0.4_A가 줄어들었고 THD는 14%로 대칭적인 스위칭 방식(11.7%)보다 약 2%가 증가하였다.



(a) 대칭적인 스위칭 방식



(b) 비대칭적인 스위칭 방식

그림 4 대칭과 비대칭적인 스위칭 방식에서의 인덕터 전류 파형 비교

Fig. 4 Comparison of Inductor Current Waveforms between Symmetric and Asymmetric Switching Methods

3. 결론

본 논문에서는 기존 스위칭 방식 대신에 비대칭적인 스위칭을 사용한 3-레벨 NPC DAB 컨버터에서 인덕터 전류의 첨두치와 RMS값이 감소한다는 사실을 이론적 분석과 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 그러나 THD가 늘어난다는 단점이 있으므로, 이 장단점을 적절히 조화시키는 최적의 전력 변환 효율점을 찾는 연구를 진행할 계획이다.

이 논문은 한국전력공사 전력연구원에서 수행중인 “저압 직류배전망 독립성 실증 연구” 과제의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (D3080)

참고 문헌

- [1] Moonem, M.; Krishnaswami, H. Analysis and control of multi-level dual active bridge dc-dc converter. In Proceedings of the Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012, Raleigh, NC, USA, 15 - 20 September 2012; pp. 1556 - 1561.