

TAB에 적용 가능한 통합 변압기 기반의 전압 밸런싱 기법

이승훈, 차현녕
경북대학교

Integrated Transformer-Based Voltage Balancing Technique for TAB Converter

Seunghoon Lee, Honnyong Cha
Kyungpook National University

ABSTRACT

Triple-active-bridge (TAB) 컨버터는 이중 출력 구조를 가지며 양방향 전력 전달 및 영전압 스위칭이 가능한 장점이 있어 양극성 dc 배전에 적용 가능해 널리 사용되는 컨버터이다. 하지만 TAB 컨버터는 두 출력의 부하 차이에 따라 출력 전압 불균형이 발생할 수 있으며 이러한 불균형을 해결하기 위해 다양한 전압 밸런서에 관한 연구들이 진행되고 있다. 본 논문에서는 추가적인 밸런서 혹은 제어기 없이 TAB 컨버터에 존재하는 외부 인덕터를 변압기와 통합하여 전압 밸런싱의 역할을 할 수 있는 통합 변압기 구조를 소개하며 4-kW의 시제품을 통해 제안하는 전압 밸런싱 방법을 검증하였다.

1. 서론

최근 신재생 에너지의 급격한 발전에 따라 DC 배전에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^[1]. 양극성 DC 배전에 적용 가능한 컨버터 중 Triple-Active-Bridge(TAB) 컨버터는 이중 출력 구조를 가지며 양방향 전력전달 및 영전압 스위칭 (Zero-voltage switching, ZVS)이 가능해 널리 사용되는 컨버터이다^[1].

이중 출력 구조의 컨버터는 각 출력의 부하 차이에 의해 전압 불평형 문제가 발생할 수 있으며 이를 해결하기 위해 다양한 전압 밸런서에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^[2]. 하지만 이런 밸런서 혹은 제어기는 전체 시스템의 크기를 증가시키며 구조가 복잡해지는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해 자기소자를 통한 밸런싱 방법 또한 연구되었으나^[3-4] 여전히 ZVS를 위한 외부 인덕터가 필요하게 된다.

본 논문에서는 TAB 컨버터에 존재하는 추가 인덕터를 변압기와 결합한 통합 변압기를 통해 TAB 컨버터의 두 출력 전압을 밸런싱 하는 방법을 제안한다. UU 형상 코어를 활용한 비대칭 구조의 변압기를 활용해 TAB 컨버터에 존재하는 외부 인덕터 없이 충분한 누설 인덕턴스를 가지는 변압기를 제작하였으며 출력 전압 밸런싱 또한 달성하였다. 제안하는 통합 변압기는 성능은 4-kW 시제품을 제작하여 실험을 통해 밸런싱 성능을 검증하였다.

2. 결합 변압기의 구조

제안하는 통합 변압기가 적용된 TAB 컨버터의 구조는 그림 1과 같다. 3개의 H-bridge가 각 포트의 입력과 출력을 구성

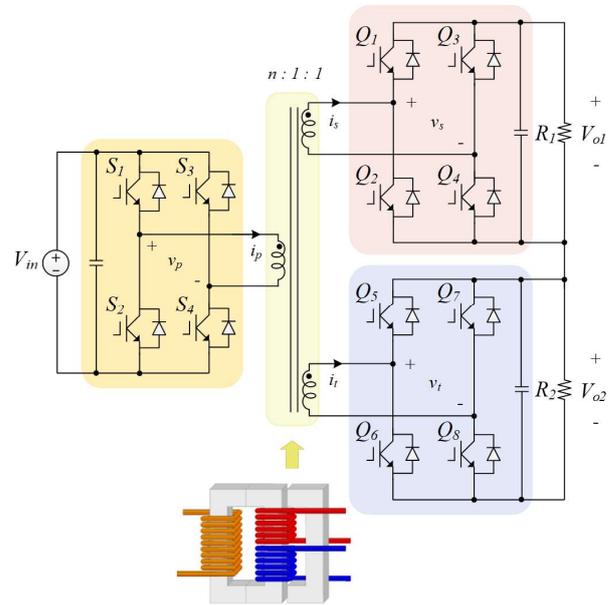


그림 1 제안하는 통합 변압기를 적용한 TAB 컨버터
Fig. 1 TAB converter with proposed integrated transformer

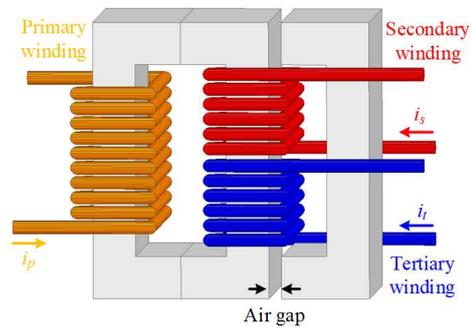


그림 2 제안하는 통합 변압기
Fig. 2 Configuration of proposed integrated transformer

하며 하나의 고주파 변압기를 통해 전력 전달 및 절연 기능을 제공한다. 제안하는 통합 변압기를 적용한 경우 변압기의 누설 자속 경로를 통해 인덕터의 역할까지 가능하기에 추가적인 인덕터가 필요하지 않다.

제안하는 통합 변압기의 구조는 그림 2와 같다. UU 형상의

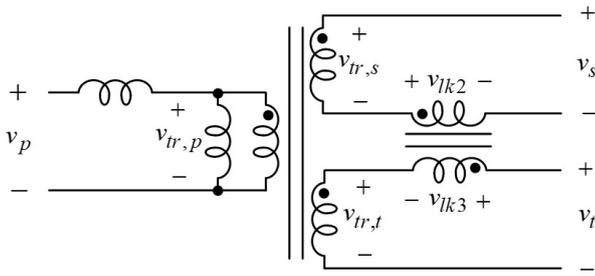


그림 3 제안하는 통합 변압기의 등가 모델
Fig. 3 Equivalent model of the proposed integrated transformer

표 1 TAB 컨버터 실험 사양
Table 1 Electrical Specification of the TAB Converter

Parameters	Values
Output power	4 kW
Input voltage	200 V
Output voltages	100 V
Turns ratio of transformer	2 : 1 : 1

코어 왼쪽 레그에 1차 권선이 감겨 있으며 오른쪽 레그에는 2, 3차 권선이 함께 감겨 있다. 추가적으로 누설 자속 경로를 형성해 주기 위해 2, 3차 권선 바깥쪽에 U 코어를 추가 하였으며 필요한 누설 인덕턴스 값에 맞게 변압기를 설계하기 위해 외부 코어에 공극을 추가하였다.

3. 결합 변압기의 밸런싱 원리

제안하는 통합 변압기는 UU 형상 코어를 통해 1차 권선과 2, 3차 권선 간 자기 인덕턴스를 형성하며 누설 자속 경로인 바깥쪽 U 코어를 통해 누설 인덕턴스 역할을 하게 된다. 또한 2차 권선과 3차 권선은 같은 코어 레그에 감겨 있기에 두 권선 사이에는 누설 인덕턴스가 존재하지 않는다. 그림 3에 변압기의 등가 모델을 나타내었다. 등가 모델에서 출력 측 두 H-bridge 전압 v_s 와 v_t 는 (1), (2)와 같이 나타낼 수 있다.

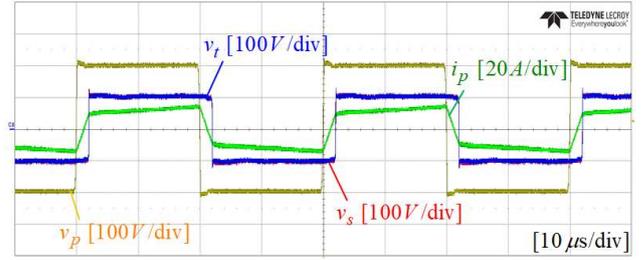
$$v_s = v_{tr,s} + v_{lk2} \quad (1)$$

$$v_t = v_{tr,t} + v_{lk3} \quad (2)$$

변압기의 2, 3차측 권선은 같은 레그에 감겨 있기에 $v_{tr,s} = v_{tr,t}$ 와 $v_{lk2} = v_{lk3}$ 를 만족하며 따라서 v_s 와 v_t 가 동일해지는 결과를 확인할 수 있다.

4. 실험 결과

제안하는 통합 변압기 성능을 검증하기 위해 표 1의 조건에 따라 4-kW 시제품을 제작하여 실험을 진행하였다. 각 부하의 출력은 최대 2-kW이며 실험 결과는 그림 4에 나타내었다. 불평형 부하 조건을 위해 R_2 가 탈락한 경우에 대한 실험을 진행하였으며 그림 4와 같이 부하가 다르더라도 각 H-bridge 전압 (v_s, v_t) 과 출력 전압 (V_{o1}, V_{o2})이 밸런싱 되는 결과를 확인할 수 있다.



(a)

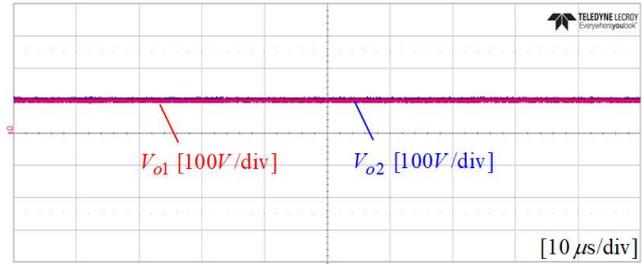


그림 4 제안하는 통합 변압기를 적용한 전압 밸런싱 실험 결과
(a) 각 H-bridge 전압 (v_p, v_s, v_t), (b) 출력 전압 (V_{o1}, V_{o2})

Fig. 4 Experimental waveforms with proposed integrated transformer
(a) H-bridge voltages (v_p, v_s, v_t), (b) Output voltages (V_{o1}, V_{o2})

5. 결론

본 논문에서는 양극성 DC 배전 시스템에 적용 가능한 전압 밸런싱 기능을 갖는 통합 변압기 기반의 TAB 컨버터에 대해 소개한다. 제안하는 결합 변압기는 UU 형상 코어 3개의 비대칭 구조로 구성되며 2차, 3차 권선이 변압기의 같은 레그에 결합되어 전압 밸런싱을 만족시킨다. 또한 2, 3차측 권선 쪽에 추가된 U 코어의 공극을 통해 동작에 필요한 누설 인덕턴스 값을 만족시킬 수 있다. 제안하는 변압기의 동작 및 밸런싱 역할을 4-kW의 시제품을 통해 검증하였으며 하나의 부하가 탈락된 경우에도 전압 밸런싱 역할을 할 수 있는 결과를 확인하였다.

참고 문헌

- [1] S. Rivera, R. Lizana F., S. Kouro, T. Dragičević, and B. Wu, "Bipolar DC Power Conversion: State-of-the-Art and Emerging Technologies," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 9, no. 2, pp. 1192-1204, Apr. 2021.
- [2] K. Kim and H. Cha, "Dual-Active-Half-Bridge Converter With Output Voltage Balancing Scheme for Bipolar DC Distribution System," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 69, no. 7, pp. 6850-6858, Jul. 2022.
- [3] N. Naseem and H. Cha, "Triple-Active-Bridge Converter With Automatic Voltage Balancing for Bipolar DC Distribution," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 37, no. 7, pp. 8640-8648, Jul. 2022.
- [4] U. Ahmad and H. Cha, "Coupled Inductor Based Voltage Balancing in Dual-Output CLL Resonant Converter for Bipolar DC Distribution System," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 38, no. 1, pp. 1262-1274, Jan. 2023.