

다수의 변압기를 도입하여 포트 간 전력의 비동조화를 달성할 수 있는 DC 배전용 Quadruple-Active-Bridge 컨버터에 관한 연구

김인혁, 이준영, 정지훈
울산과학기술원(UNIST)

A Research on Power Decoupled Quadruple-Active-Bridge Converter Adopting Multiple Transformers for DC Distribution System

Inhyeok Kim, Jun-Young Lee, and Jee-Hoon Jung
Ulsan National Institute of Science and Technology(UNIST)

ABSTRACT

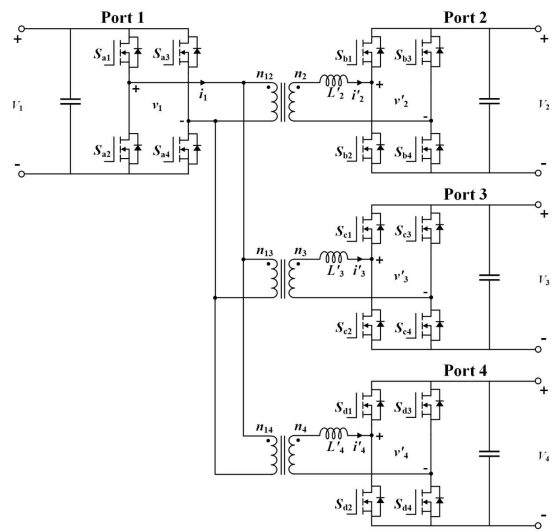
본 논문에선 다수의 변압기를 도입하여 복수의 입출력 포트 간 전력 동조화 문제를 해결할 수 있는 Quadruple-Active-Bridge (QAB) 컨버터를 제안한다. 기존 QAB 컨버터는 단일 변압기를 사용하기 때문에 입출력 포트 사이의 전력 동조화 문제가 발생한다. 따라서 단일 변압기에서 포트 간 전력 비동조화를 달성하기 위해 입력 포트의 누설 인덕턴스를 최소화하는 최적의 변압기 설계가 필요하나, 복수의 권선 구조로 인해 최적의 설계가 어렵다는 단점이 있다. 이러한 문제점을 해결하고자 본 논문에선 기존의 단일 변압기와 복수의 변압기를 함께 설치하는 구조를 제안한다. 제안한 구조를 통해 별도의 비동조화 알고리즘 없이 출력 포트 사이의 전력 동조화 문제를 해결할 수 있다. 그리고 변압기의 설계도 복잡했던 기존 QAB와는 달리 쉬워지는 이점도 있다. 제안한 컨버터의 구조 및 전력 비동조화를 등가 모델을 통해 이론적으로 분석한다. 그리고 이를 검증하고자 3 kW급 시작품을 통해 전력 전달 구조 및 전력 비동조화를 검증한다.

1. 서론

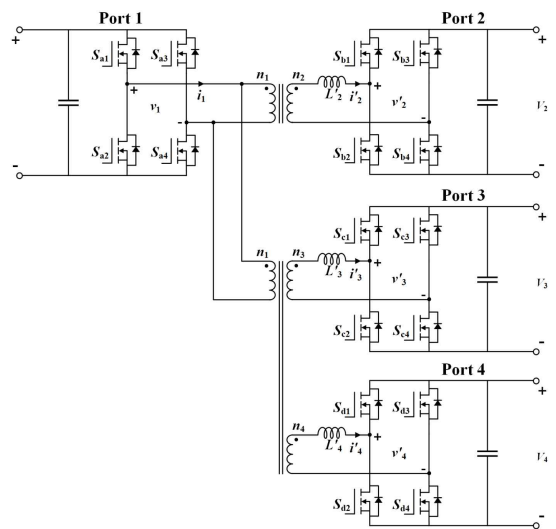
교류 배전의 대체 방안으로 교류 배전에서 발생하는 송전 손실의 감소와 전력변환 단계를 줄일 수 있는 직류 배전이 각광 받고 있다. 이러한 직류 배전의 이점을 이용하여 태양광 및 풍력 발전 등의 신재생 에너지와 에너지 저장 장치 그리고 DC 마이크로그리드 까지 직류 배전의 이용도가 높아지고 있다.

직류 배전에서 신재생 에너지 및 에너지 저장 장치들과 같은 여러 에너지원과 전력 부하 간 양방향 전력전달을 제어하기 위한 DC-DC 컨버터에 관한 많은 연구가 진행되고 있다. 그중에서 널리 이용되는 구조로 Dual-Active-Bridge (DAB) 컨버터가 있다. DAB 컨버터는 변압기의 1차측과 2차측에 인가되는 전압의 위상차를 이용하여 전력 전달 방향을 결정한다. 그리고 변압기를 이용하므로 입출력 사이의 전기적 절연을 이룰 수 있다^[1].

DC 마이크로그리드에선 계통에서 직접 전원을 공급받기도 하지만 신재생 에너지원 및 에너지 저장 장치와 같은 다른 에너지원에서 공급받는 경우도 존재한다. 이때 일반적인 2포트 DAB 컨버터를 이용하면 두 단계의 전력변환 장치를 거쳐야 하므로 시스템의 전력 효율이 낮아지는 문제점이 발생한다. 그리고 다수의 2포트 DAB 컨버터를 이용하므로 시스템의 소자의 수가 증가하며 부피가 커지게 되어 전력밀도가 감소하는



(a)



(b)

그림 1. 제안하는 Quadruple-Active-Bridge 컨버터의 회로도: (a) 복수의 단일 변압기를 이용한 QAB, (b) 2-와인딩과 3-와인딩 변압기를 이용한 QAB

Fig. 1. Circuit diagrams of the proposed QAB converter: (a) Employing three single-winding transformers, (b) employing both two-winding and three-winding transformers

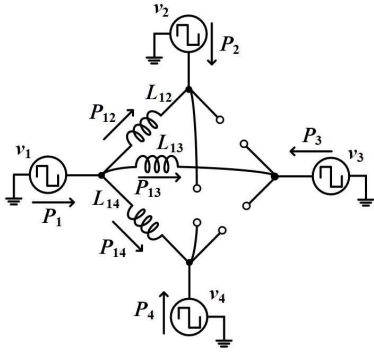


그림 2. 제안하는 QAB 컨버터의 등가회로
Fig. 2. Equivalent circuit diagram of the proposed QAB converter

문제점이 있다. 이를 방지하고자, 다중포트 컨버터를 이용한다^[2].

하지만, 일반적인 다중포트 컨버터는 단일 변압기를 이용하는 구조이다. 이로 인해 임의의 두 출력 포트 사이에서 전력 동조화 문제가 발생하게 된다. 전력 동조화 문제를 해결하기 위해 비동조화 알고리즘으로 비동조화 행렬을 도입하여 출력 포트 사이의 전력 동조화 문제를 해결하는 방법도 있다^[3]. 하지만, 이로 인해 컨버터의 제어가 복잡해지는 문제점이 있다. 이를 해결하고자 다수의 변압기를 이용하는 QAB 컨버터를 제안하고자 한다.

2. 제안하는 Quadruple-Active-Bridge (QAB) 컨버터

2.1 제안하는 QAB 컨버터의 구조 및 전력전달 분석

제안하는 QAB 컨버터는 그림 1과 같다. 단일 변압기를 이용하는 기존의 구조와는 달리 제안한 구조는 그림 1의 (a)와 같이 출력 포트의 수 만큼 변압기를 이용하여 구성할 수 있다. 또한 그림 1의 (b)와 같이 2-와인딩 변압기와 3-와인딩 변압기를 이용하여 QAB를 구성할 수 있다.

제안한 QAB 컨버터의 입력 포트와 임의의 출력 포트 사이의 전력 전달식을 표현하기 위해 그림 1의 회로 대신 그림 2의 등가회로를 이용한다. 그림 1의 두 경우 모두 그림 2와 같은 등가회로로 표현할 수 있으며 이를 이용하여 두 포트 사이의 전력 전달식을 표현할 수 있다. 제안한 QAB에서 입력 포트와 각 출력 포트 사이의 전력 전달식은 식 (1)과 같다. 여기서 P_{ab} 는 포트 a에서 포트 b로 전달되는 전력, f_{sw} 는 스위칭 주파수, L_{ab} 는 두 포트 사이의 등가 인덕턴스, 그리고 ϕ_{ab} 는 포트 a에 대한 포트 b의 전압의 위상차를 나타낸 것이다.

$$P_{1x} = \frac{V_1 V_x}{2\pi^2 f_{sw} L_{1x}} \phi_{1x} (\pi - \phi_{1x}), x = 2, 3, 4 \quad (1)$$

그리고 각 포트의 전력을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_1 = P_{12} + P_{13} + P_{14} \quad (2)$$

$$P_2 = -P_{12} \quad (3)$$

$$P_3 = -P_{13} \quad (4)$$

$$P_4 = -P_{14} \quad (5)$$

2.2 제안하는 QAB 컨버터의 전력 제어 알고리즘

제안하는 QAB의 각 포트의 전력은 식 (2)-(5)을 통해 입력 포트인 포트 1에 대한 각 출력 포트인 포트 2, 포트 3, 그리고 포트 4의 전압의 위상차에 대한 식으로 표현된다. 그리고 각 출력 포트의 전력이 결정되면 이를 이용해 입력 포트의 전력을 도출할 수 있다. 이를 이용하여 시스템의 입력을 전압의 위상차 ϕ_{12} , ϕ_{13} , ϕ_{14} 로 나타내고 출력을 각 출력 포트의 전력 P_2 , P_3 , P_4 로 정하면 입력력 사이의 관계식인 3차 정방행렬로 표현되는 시스템 행렬을 구할 수 있다.

먼저, 식 (3)-(5)을 다시 표현하면 아래의 식과 같다.

$$P_x = \frac{V_1 V_x}{2\pi^2 f_{sw} L_x} \phi_{1x} (\pi - \phi_{1x}), x = 2, 3, 4 \quad (6)$$

제안한 컨버터 시스템의 선형화를 위해 식 (6)을 위상차에 대한 일차함수 형태로 표현하고자, 위상차에 대한 항에 푸리에 급수를 적용하여 삼각함수로 근사화한다. 그리고, 각 출력 포트의 동작점을 $\phi_{op,12}$, $\phi_{op,13}$, $\phi_{op,14}$ 로 각각 정의하여 삼각함수 형태로 근사화된 식에서 테일러 급수를 적용하여 위상차에 대한 일차함수의 형태로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_2 \approx G_{11} \phi_{12} \quad (7)$$

$$G_{11} = \frac{V_1 V_2 \cos(\phi_{op,12})}{0.25\pi^3 f_{sw} L_2} \quad (8)$$

$$P_3 \approx G_{22} \phi_{13} \quad (9)$$

$$G_{22} = \frac{V_1 V_3 \cos(\phi_{op,13})}{0.25\pi^3 f_{sw} L_3} \quad (10)$$

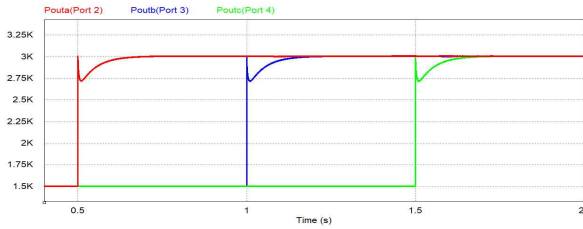
$$P_4 \approx G_{33} \phi_{14} \quad (11)$$

$$G_{33} = \frac{V_1 V_4 \cos(\phi_{op,14})}{0.25\pi^3 f_{sw} L_4} \quad (12)$$

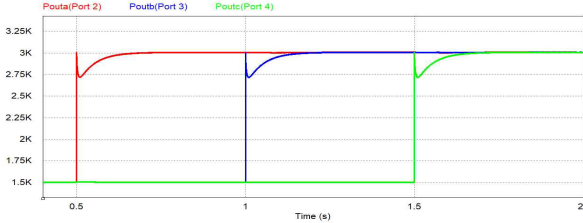
컨버터 시스템의 입력을 포트 사이의 위상차 ϕ_{12} , ϕ_{13} , ϕ_{14} 로 정의하고 출력을 각 출력 포트의 전력 P_2 , P_3 , P_4 로 정의하면 제안한 QAB 컨버터의 시스템 행렬 G 를 식 (7)-(12)을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{12} \\ \phi_{13} \\ \phi_{14} \end{bmatrix} \quad (13)$$

단일 변압기를 이용한 QAB의 시스템 행렬과는 달리, 제안한 QAB 컨버터의 시스템 행렬은 식 (13)과 같이 대각 성분인



(a)



(b)

그림 3. QAB 컨버터 구조에 따른 전력 시뮬레이션 결과: (a) 복수의 단일 변압기를 이용한 QAB, (b) 2-와인딩과 3-와인딩 변압기를 이용한 QAB

Fig. 4. Simulation results of the proposed QAB converter: (a) employing three single-winding transformers, (b) employing both 2-winding and 3-winding transformers

G_{11} , G_{22} , G_{33} 만 값이 존재한다는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 별도의 전력 비동조화 알고리즘 없이 각 출력 포트 사이의 전력 비동조화를 달성할 수 있음을 확인할 수 있다.

3. 모의시험 및 실험결과

그림 3은 그림 1의 (a)와 (b) 구조를 이용한 QAB의 PSIM 모의시험 결과를 나타낸 것이다. 모의시험의 조건은 모두 동일하게 각각 0.5 초, 1 초, 1.5 초 지점에서 각 출력 포트의 전력을 1.5 kW에서 3 kW로 올리는 스텝 부하 상황이다. 그림 3의 (a), (b)와 같이 복수의 변압기를 도입한 QAB 컨버터에선 각 출력 포트의 전력이 변할 때 다른 출력 포트에는 영향을 주지 않음을 확인할 수 있다. 이를 통해 별도의 비동조화 알고리즘 없이 출력 포트 간의 전력 비동조화를 이룰 수 있음을 확인할 수 있다.

그림 4은 그림 1의 (a) 구조를 이용하여 구성된 3포트 DAB 컨버터의 전력 비동조화 실험 파형이다. 실험에 이용한 컨버터의 사양은 표 1과 같다. 그림 4의 실험은 포트 2의 전력을 500 W에서 1.5 kW로 변화를 주는 스텝 부하 실험이다. 포트 2의 전류를 순간적으로 증가시켰을 때, 포트 3의 전압은 변화가 없음을 확인할 수 있다. 이를 통해 출력 포트 사이의 전력 비동조화를 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에선 각 출력 포트 사이의 전력 비동조화를 달성할 수 있는 QAB 컨버터에 대해 제안하였다. 제안한 컨버터는 기존의 단일 변압기와 달리 다수의 변압기를 이용하여 추가적인 비동조화 알고리즘 없이 출력 포트 간 전력 비동조화를 이룰 수 있다. 제안한 구조의 동작 원리는 2포트 DAB와 같이 각 포트 사이의 전압의 위상차를 통해 양방향 전력전달이 가능하며

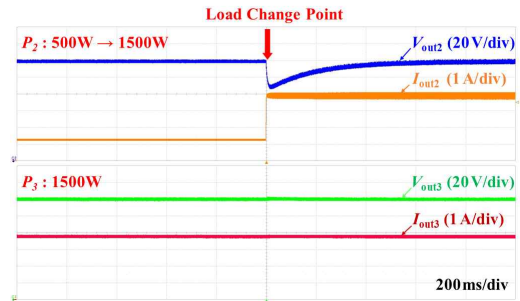


그림 4. 복수의 변압기를 도입한 3포트 DAB 컨버터의 스텝부하 실험파형($P_2 : 500 \text{ W} \rightarrow 1500 \text{ W}$, $P_3 : 1500 \text{ W}$)

Fig. 3. Waveform of step load response of three-port DAB converter employing multiple transformers

표 1 복수의 변압기를 도입한 3포트 DAB 컨버터의 사양

TABLE 1 Converter specification of the 3-port DAB converter employing multiple transformers

출력 전력	3 kW
변압기 권선비	1 : 1 : 1
입력 전압 (포트 1)	380 V
출력 전압 (포트 2, 포트 3)	380 V, 380 V
커플링 인덕턴스 L_2 , L_3	97.7 μH , 96 μH
스위칭 주파수	50 kHz

기존의 QAB와는 달리 각 출력 전력이 다른 출력 포트의 전력과는 무관하다는 것을 수식적으로 유도하였다. 그리고 제안한 구조를 이용한 3포트 컨버터에서 실험적으로 전력 비동조화를 확인했으며, 시뮬레이션을 통해 제안한 QAB 컨버터의 전력 비동조화를 달성할 수 있음을 확인하였다.

이 논문은 2019년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 중견연구사업임 (NRF-2019R1A2B5B01069665)

참고 문헌

- [1] H. J. Choi and J. H. Jung, "Practical design of dual active bridge converter as isolated bi-directional power interface for solid state transformer applications," J. Electr. Eng. Tech., Vol. 11, No. 5, pp. 1265-1273, Sep. 2016.
- [2] H. Tao, A. Kotsopoulos, J. L. Duarte and M. A. M. Hendrix, "Family of multiport bidirectional DC-DC converters," in IEE Proceedings - Electric Power Applications, vol. 153, no. 3, pp. 451-458, 1 May 2006
- [3] C. Zhao, S. D. Round and J. W. Kolar, "An Isolated Three-Port Bidirectional DC-DC Converter With Decoupled Power Flow Management," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 23, no. 5, pp. 2443-2453, Sept. 2008