

복수의 변압기를 사용하여 독립 전력제어가 가능한 DC 배전용 다중포트 Dual-Active-Bridge 컨버터

김인혁¹, 심주영², 이준영¹, 정지훈[†]

Power Decoupled Multi-Port Dual-Active-Bridge Converter Employing Multiple Transformers for DC Distribution Applications

Inhyeok Kim¹, Ju-Young Sim², Jun-Young Lee¹, and Jee-Hoon Jung[†]

Abstract

This study proposes a power decoupled multi-port dual-active-bridge (DAB) DC-DC converter employing multiple transformers. Conventional multiport DAB DC-DC converters experience a power coupling issue from the use of a single transformer, which essentially requires complex power decoupling control. To solve this issue, a multiport DAB DC-DC converter employing multiple transformers is proposed to decouple output power without additional complex control algorithms. The proposed converter uses multiple transformers that can expand output ports easily. Therefore, transformers and the proposed multi-port DAB converter can be designed simply. In addition, the number of coupling inductors can be reduced in the proposed three-port DAB converter compared with that in conventional multiport DAB converters. The power decoupling characteristics and equivalent circuit of the proposed converter are analyzed using theoretical model approaches. Finally, a 3-kW laboratory prototype is developed to verify the effectiveness of the proposed converter.

Key words: DC distribution, Decoupling power control, DAB(Dual-Active-Bridge) converter, Multi-port converter, Multiple transformers

1. 서 론

현재 이용되는 AC 배전의 대체재로 교류 저항에 의한 송전 손실이 없으며 전력 변환 단계가 줄어드는 이점이 있는 DC 배전이 많은 관심을 받고 있다. 이러한 DC 배전의 장점을 이용하여 신재생 에너지, 에너지 저장장치, 전기 차량 충전소 그리고 DC 마이크로 그리드에 이르기까지 DC 배전의 필요성이 증가하고 있다^[1].

DC 배전에서 전력 전달 효율을 높게 가지는 컨버터에 관한 연구들이 진행되어 왔다^[2]. DC 배전에서 신재생 에너지의 일종인 태양광 발전과 에너지 저장장치는

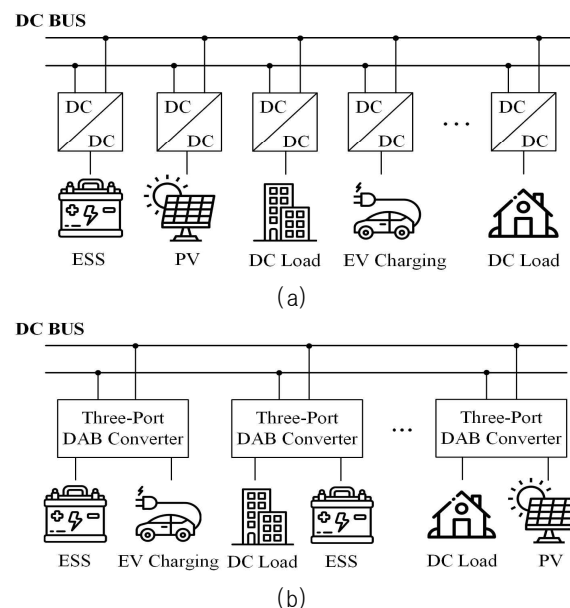


Fig. 1. System configuration of DC distribution. (a) Using two-port DAB converters, (b) Using three-port DAB converters.

Paper number: TKPE-2020-25-4-6

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: jhjung@unist.ac.kr, School of Electrical & Computer Engineering, UNIST

Tel: +82-52-217-2140 Fax: +82-52-217-2109

¹ School of Electrical & Computer Engineering, UNIST

² LG Electronics

Manuscript received Feb. 13, 2020; revised Mar. 12, 2020; accepted Apr. 8, 2020

전기 에너지원으로 볼 수 있다. 그리하여 기존 발전소에서의 단방향 송배전이 아닌 DC 배전의 에너지원과 부하 사이의 전력 전달 및 제어를 위한 양방향 DC-DC 컨버터의 필요성이 대두되고 있다^{[3],[4]}.

양방향 DC-DC 컨버터 중에서 널리 이용되고 있는 Topology로 Dual-Active-Bridge(DAB) 컨버터가 있다. DAB 컨버터는 변압기에 인가되는 전압의 위상차를 통해 양방향 전력 전달이 가능하며, 변압기를 이용하여 전기적 절연을 이룰 수 있다^[5].

하지만, 그림 1의 (a)와 같은 2포트 DAB 컨버터에선 DC 버스에 접속되는 DC 유닛의 수가 증가할수록 연결되는 컨버터의 수도 증가하게 된다. 이에 따라 배전 시스템의 전체적인 부피가 증가할 뿐만 아니라 시스템을 구성하는 소자의 수도 증가하여 제작 및 설치 단가가 증가하는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하고자 다중포트 DC-DC 컨버터가 개발되어 왔다^[6]. 다중포트의 최소 단위인 3포트 DAB 컨버터는 그림 1의 (b)와 같이 2개의 DC 유닛을 하나의 컨버터를 통해 DC 버스에 접속시켜 2포트 DAB 컨버터 대비 사용되는 컨버터의 수가 적어지며 제작 및 설치 비용이 줄어드는 장점이 있다^[7].

다중포트 DAB 컨버터에선 임의의 두 포트 사이의 전력 커플링 문제가 발생한다. 이는 1개의 변압기를 이용하여 다수의 DC 유닛을 연결하는 구조에서 발생한다. 이러한 전력 커플링을 해결하는 방법들 가운데 하나로 디커플링 행렬을 도입하는 방법이 제안되었다^[8]. 이 방법에선 Look-up table을 이용하여 디커플링 행렬을 구성한다. 그리고 디커플링 행렬은 컨버터의 시스템 행렬의 역행렬로 표현된다. 이는 포트의 수가 증가할수록 시스템 행렬의 차수도 증가하여 디커플링 행렬의 연산량이 기하급수적으로 커지게 되어 이를 이용한 전력 디커플링 제어의 복잡도가 증가하는 문제점이 있다.

다중포트 컨버터에서 전력제어의 복잡성을 줄이기 위해 구조적으로 디커플링을 달성하는 방법이 제안되어 왔다. 기존의 커플링 인덕터에 직렬로 커패시터를 추가하는 방법이 제안되었다^[9]. 하지만, 이 구조에선 3포트 DAB 컨버터의 구조를 이용하더라도 포트 간 양방향 전력제어가 불가능한 문제가 있다. 그리고 1개의 변압기를 이용하여 전력 디커플링을 위한 최적의 변압기 설계의 한계점이 있다^[10].

본 논문에선 기존 다중포트 컨버터 구조에서 포트 확장성을 늘리기 위해 복수 변압기를 사용한 다중포트 DAB 컨버터를 제안한다. 복수 변압기를 도입한 다중포트 DAB 컨버터에서 다중포트의 최소단위인 3포트 DAB 컨버터를 통해 등가 모델, 기본 동작 원리 그리고 포트 간 전력 전달을 이론적으로 분석하고 이를 k개의 포트를 갖는 컨버터에 대해 확장한다. 이를 검증하고자, 3포트 DAB 컨버터 통해 제안하는 구조의 유효성을 확인한다.

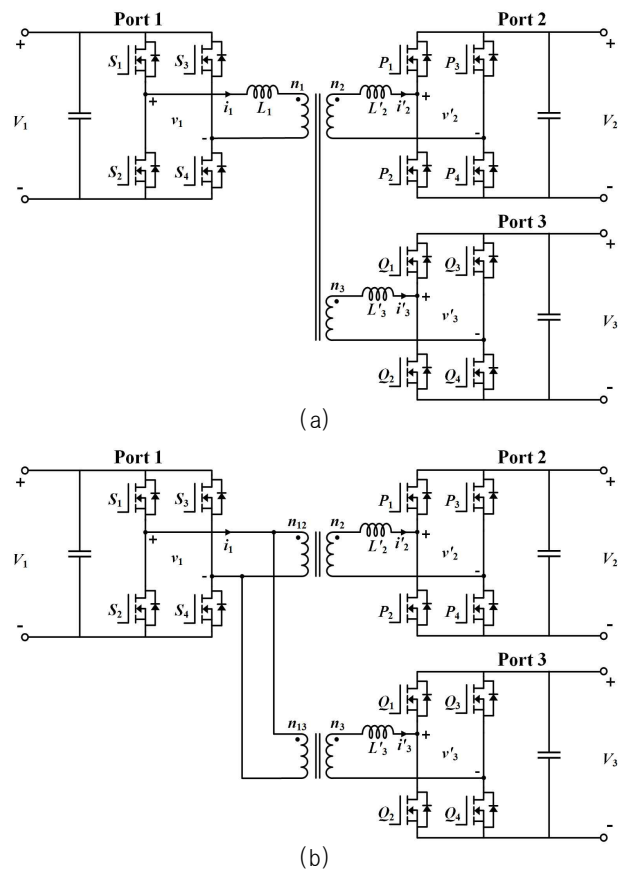


Fig. 2. Circuit diagrams of three-port DAB converters. (a) Conventional structure, (b) Employing multiple transformers.

2. 복수 변압기를 도입한 다중포트 DAB 컨버터

2.1 제안한 다중포트 DAB 컨버터의 구조

기존 다중포트 DAB 컨버터에선 그림 2의 (a)와 같이 단일 변압기를 이용하여 다수의 출력 포트를 접속하는 구조이다. 기존에는 1개의 변압기를 사용하기 때문에, 접속하는 포트의 수가 증가할수록 변압기의 설계가 복잡해지는 문제가 있다^[11]. 하지만, 그림 2의 (b)와 같은 복수 변압기를 도입한 다중포트 DAB 컨버터에서는 출력 포트의 수 만큼 변압기를 사용하는 구조다. 기존의 다중포트 컨버터의 변압기 설계와는 달리 제안한 구조에선 기존 2포트 컨버터의 변압기와 같은 방법으로 설계하는 구조이다^[12]. 즉, 포트의 수가 증가할수록 기존 다중포트 컨버터 대비 포트의 확장이 용이한 구조이다.

기존 다중포트 DAB 컨버터와 달리 컨버터의 커플링 인덕턴스의 수가 줄어든다. 기존 다중포트 컨버터에선 그림 2의 (a)와 같이 각 포트의 커플링 인덕턴스로 외부 인덕터를 연결하는 구조이다. 이로 인해 포트의 수가 증가할수록 포트 사이의 전력 디커플링을 위한 제어기 설계가 복잡해진다^[13]. 하지만, 제안한 구조에선 커플링 인덕턴스의 수를 하나 줄이는 구조이다. 이러한 특징으로 제안한 구조에선 커플링 인덕터의 감소와 포트 간 완전한 전력 디커플링을 이룰 수 있다.

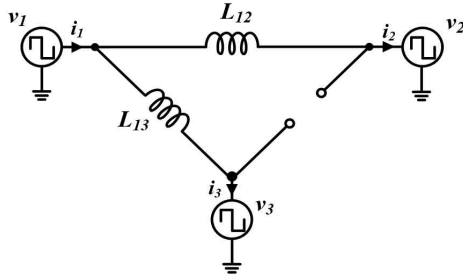


Fig. 3. Equivalent circuit model of the proposed three-port DAB converter.

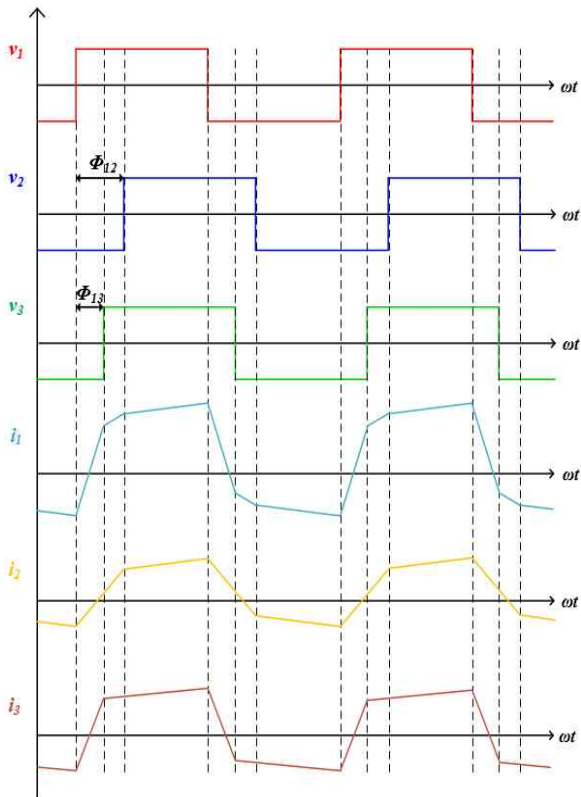


Fig. 4. Theoretical waveforms of the proposed three-port DAB converter.

2.2 제안한 다중포트 컨버터의 전력 전달 분석

제안한 3포트 DAB 컨버터의 동작은 기존의 DAB 컨버터와 동일하게 같은 대각선상에 있는 스위치 x_1 과 x_4 , x_2 와 x_3 가 짝을 이뤄 50%의 시비율을 갖고 상보적으로 동작한다^[4]. 이러한 동작 특성으로 변압기에 인가되는 전압은 구형파의 형태가 된다. 변압기의 자화 인덕턴스를 무시하고 앞서 설명한 전압의 특성과 제한한 구조를 이용하여 그림 3과 같이 3포트 DAB 컨버터의 등가회로를 얻을 수 있다. 포트 1의 전압에 대한 포트 2와 포트 3의 전압의 위상차를 각각 ϕ_{12} , ϕ_{13} 이라고 정의하면 그림 4와 같은 주요 동작 파형을 볼 수 있다.

여기서 그림 4는 $\phi_{12} > \phi_{13}$ 의 조건에 대한 동작을 보여준다.

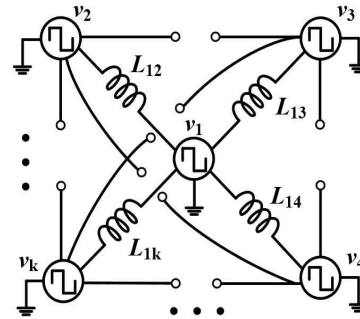


Fig. 5. Equivalent circuit diagram of multi-port DAB converter with multiple transformers.

복수 변압기를 도입한 3포트 DAB 컨버터의 포트 간 전력 전달은 식 (1), (2)와 같이 표현할 수 있다. 여기서 P_{ij} 는 i 포트에서 j 포트로 전달되는 전력을 나타내며 P_i 는 P_{ij} 와 P_{ik} 의 합으로 표현할 수 있다.

$$P_{12} = \frac{V_1 V_2}{2\pi^2 L_{12} f_{sw}} \phi_{12} (\pi - \phi_{12}) \quad (1)$$

$$P_{13} = \frac{V_1 V_3}{2\pi^2 L_{13} f_{sw}} \phi_{13} (\pi - \phi_{13}) \quad (2)$$

기존 3포트 DAB 컨버터와는 달리 복수 변압기를 이용한 DAB 컨버터에선 변압기의 1차측 누설 인덕턴스가 입력 포트의 커플링 인덕턴스에 영향을 주지 않는 구조이다. 이로 인해 제안한 구조의 등가회로에서 L_{23} 가 무한대가 되어 회로적으로 개방됨을 알 수 있다. 그리하여 두 출력 포트 사이에 전력 전달 경로가 존재하지 않으므로 P_{23} 는 0이 됨을 확인할 수 있다. 그리고 각 포트의 전력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_1 = P_{12} + P_{13} \quad (3)$$

$$P_2 = P_{21} \quad (4)$$

$$P_3 = P_{31} \quad (5)$$

앞선 3포트 DAB 컨버터의 내용을 바탕으로 k 개의 포트를 갖는 다중포트 DAB 컨버터의 전력 전달 분석으로 확장할 수 있다. 복수 변압기를 도입한 k 포트 DAB 컨버터의 등가회로는 그림 5와 같이 표현할 수 있다. 그림 5는 k 포트 DAB 컨버터에서 변압기의 자화 인덕턴스를 무시하고 입력 포트와 각 출력 포트 사이의 변압기에 인가되는 전압의 특성을 반영한 등가회로이다. 입력 포트인 포트 1에서 임의의 출력 포트 k 로의 전력 전달식은 다음과 같이 표현할 수 있다. 식 (6)에서 포트 k 의 전압을 V_k , 포트 1과 포트 k 사이의 전압의 위상차를 ϕ_{1k} 로 정의하였다.

$$P_{1k} = \frac{V_1 V_k}{2\pi^2 L_{1k} f_{sw}} \phi_{1k} (\pi - \phi_{1k}) \quad (6)$$

그림 3을 통해 3포트 컨버터에서 두 출력 포트 사이의 전력 전달 경로가 존재하지 않음을 확인하였다. 이는 출력 포트의 수가 증가하더라도 임의의 두 출력포트 사이의 전력 전달이 일어나지 않음을 그림 5를 통해 확인할 수 있다. 이때, 임의의 두 출력포트 사이의 관계식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{ij} = 0, \quad i, j = 2, 3, \dots, k, \quad i \neq j \quad (7)$$

식 (6), (7)을 이용하여 제안한 k포트 DAB 컨버터에서 입력 포트와 각 출력 포트의 전력을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_1 = \sum_{n=2}^k P_{1n} \quad (8)$$

$$P_n = P_{n1}, \quad n = 2, 3, \dots, k \quad (9)$$

3. 복수 변압기를 이용한 다중포트 DAB 컨버터의 독립 전력제어

제안한 3포트 DAB 컨버터에서 각 포트의 전력은 식 (3)-(5)를 통해 포트 1에 대한 포트 2와 포트 3의 전압의 위상차 ϕ_{12} 와 ϕ_{13} 에 대한 식으로 표현된다. 그리고 두 포트의 전력 P_2, P_3 가 결정되면 P_1 은 자동으로 구해진다. 그리하여 시스템의 입력을 전압의 위상차 ϕ_{12}, ϕ_{13} 로 나타내고 출력을 포트 2와 포트 3의 전력 P_2, P_3 로 정하면 입출력 사이의 관계식인 2차 정방행렬로 표현되는 시스템 행렬 G 를 구할 수 있다. 앞서 구한 식 (4), (5)를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_2 = \frac{V_1 V_2}{2\pi^2 f_{sw} L_2} \phi_{12} (\pi - \phi_{12}) \quad (10)$$

$$P_3 = \frac{V_1 V_3}{2\pi^2 f_{sw} L_3} \phi_{13} (\pi - \phi_{13}) \quad (11)$$

컨버터 시스템의 선형화를 위해 식 (10), (11)을 위상차에 대한 일차함수의 형태로 표현하고자 한다. 먼저, 위상차에 대한 항에 푸리에 급수를 적용하여 삼각함수의 형태로 근사화한다. 다음으로 각 출력포트의 동작점을 $\phi_{12,op}, \phi_{13,op}$ 라 정의하여 삼각함수 형태의 식을 테일러 급수를 통해 위상차에 대한 일차함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다^[15].

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

$$G_{11} = \frac{V_1 V_2 \cos(\phi_{12,op})}{(1/4)\pi^3 f_{sw} L_2} \quad (13)$$

$$P_3 \approx G_{22} \phi_{13} \quad (14)$$

$$G_{22} = \frac{V_1 V_3 \cos(\phi_{13,op})}{(1/4)\pi^3 f_{sw} L_3} \quad (15)$$

시스템의 입력을 포트 사이의 위상차 ϕ_{12} 와 ϕ_{13} , 출력을 포트 2와 포트 3의 전력 P_2, P_3 로 정의하면 복수 변압기를 도입한 3포트 DAB 컨버터의 시스템 행렬 G 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{12} \\ \phi_{13} \end{bmatrix} \quad (16)$$

기존 3포트 DAB 컨버터의 시스템 행렬과 달리, 제안한 컨버터의 시스템 행렬에서 비대각성분 G_{12} 와 G_{21} 이 존재하지 않음을 확인할 수 있다. 이를 통해 각 포트의 출력 전력은 입력 포트와 각 출력 포트 사이의 위상차에 대한 식으로 표현된다. 그리고 복수 변압기를 도입한 3포트 DAB 컨버터는 별도의 디커플링 알고리즘 없이 전력 디커플링을 확인할 수 있다.

전력 전달 분석과 같이 독립 전력제어 또한 k개의 포트를 갖는 컨버터에 확장하여 적용할 수 있다. 먼저 k포트 DAB 컨버터의 각 포트의 전력 전달 식인 식 (9)를 다시 표현하면 다음과 같다.

$$P_k = \frac{V_1 V_k}{2\pi^2 f_{sw} L_k} \phi_{1k} (\pi - \phi_{1k}) \quad (17)$$

3포트 DAB 컨버터의 시스템 선형화 과정과 같이 k포트 DAB 컨버터 시스템의 선형화를 위해 식 (17)에서 위상차에 대한 항에 푸리에 급수를 적용, 임의의 포트 n의 동작점을 $\phi_{1n,op}$ 라 정의하여 k개의 포트를 갖는 다중 포트 DAB 컨버터에서 임의의 포트 n의 전력 P_n 를 위상차에 대한 일차함수의 형태로 다음과 같이 표현할 수 있다^[15].

$$P_n \approx H_{(n-1)(n-1)} \phi_{1n}, \quad n = 2, 3, \dots, k \quad (18)$$

$$H_{(n-1)(n-1)} = \frac{V_1 V_n \cos(\phi_{1n,op})}{(1/4)\pi^3 f_{sw} L_n}, \quad n = 2, 3, \dots, k \quad (19)$$

$$H_{ij} = 0, \quad i \neq j \quad (20)$$

식 (18)-(20)을 이용하여 제안한 k포트 DAB 컨버터의 시스템 행렬 H 를 다음과 같이 표현할 수 있다.

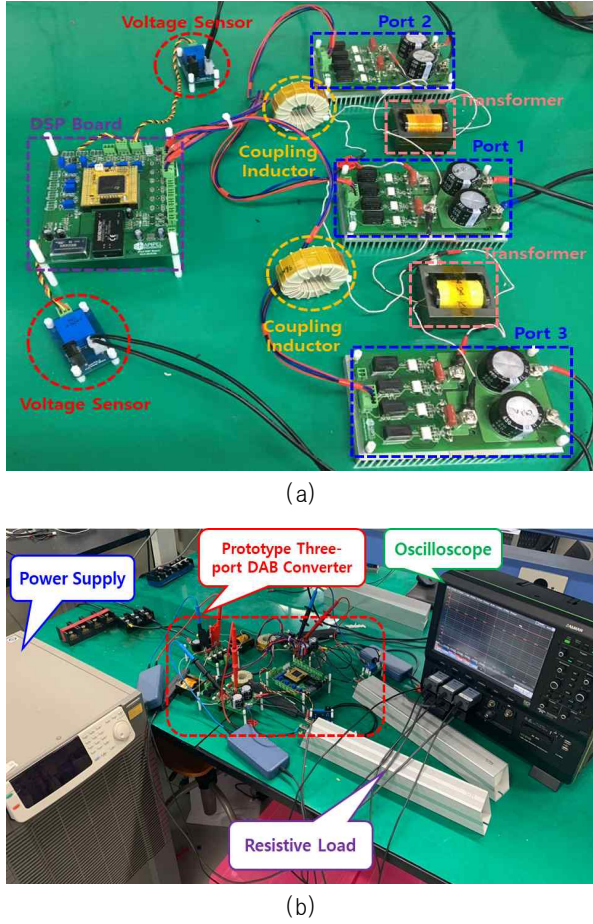


Fig. 6. Photographs of 3-kW prototype three-port DAB converter with multiple transformers. (a) Converter setup, (b) Experimental setup.

TABLE I
EXPERIMENTAL SPECIFICATIONS

Parameters	Value
Turns Ratio	1 : 1 : 1
Port 1 Voltage	$V_1 = 380$ [V]
Port 2 Voltage	$V_2 = 380$ [V]
Port 3 Voltage	$V_3 = 380$ [V]
Coupling Inductance	$L_2 = 97.7$ [μ H]
	$L_3 = 96$ [μ H]
Switching Frequency	$f_{sw} = 50$ [kHz]

$$\begin{bmatrix} P_2 \\ P_3 \\ \vdots \\ P_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & H_{22} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & H_{(k-1)(k-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{12} \\ \phi_{13} \\ \vdots \\ \phi_{1k} \end{bmatrix} \quad (21)$$

복수 변압기를 도입한 k포트 DAB 컨버터의 시스템 행렬은 (k-1)차 정방행렬로 표현되며 비대각 성분이 0이 됨을 확인할 수 있다. 복수 변압기를 도입한 구조에서

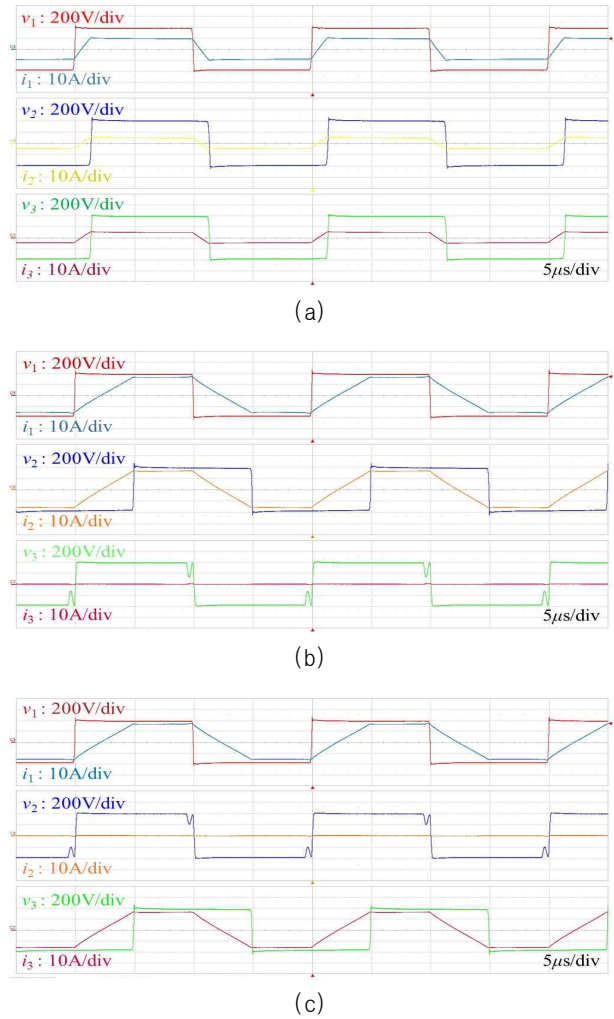


Fig. 7. Experimental steady-state waveforms of leg voltage and inductor current of the proposed three-port DAB converter. (a) When $P_1 = 3$ kW, $P_2 = -1.5$ kW, and $P_3 = -1.5$ kW, (b) When $P_1 = 3$ kW, $P_2 = -3$ kW, and $P_3 = 0$ W, (c) When $P_1 = 3$ kW, $P_2 = 0$ W, and $P_3 = -3$ kW.

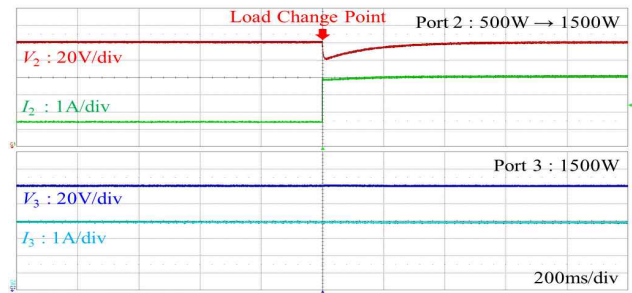


Fig. 8. Step-load response of the proposed three-port DAB converter.

출력 포트의 수가 증가하더라도 시스템 행렬이 대각행렬임을 확인할 수 있으며, 별도의 디커플링 알고리즘이 필요하지 않다.

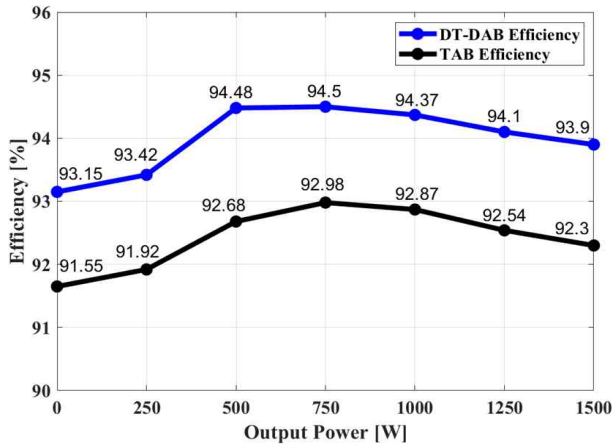


Fig. 9. Power efficiency curves of the proposed and conventional three-port DAB converters according to load variation.

4. 실험

그림 6(a)는 복수 변압기를 도입한 3포트 DAB 컨버터의 3kW급 시작품을 나타낸 것이며 그림 6(b)는 시작품을 이용한 실험 환경을 나타낸 것이다. 입력 포트인 포트 1과 출력 포트인 포트 2, 포트 3 모두 풀브리지 셀로 구성했으며, 2개의 커플링 인덕터와 2개의 변압기를 이용하였다. 시작품의 세부 사항은 표 1에 정리되어 있다.

그림 7은 시작품 컨버터의 3kW 정상상태 파형을 나타낸 것이다. 그림 7의 v_1 , v_2 , v_3 는 입력 포트와 출력 포트의 레그 전압, i_1 , i_2 , i_3 는 입력 포트와 출력 포트의 인덕터 전류를 나타낸 것이다. 그림 7(a)는 출력 포트인 포트 2와 포트 3에 입력전력의 50%인 1.5kW가 인가된 파형이다. 그림 7(b)와 (c)는 하나의 출력 포트가 최대 부하인 3kW를, 다른 출력 포트는 무부하인 상황의 전압과 전류 파형을 나타낸 것이다. 입력 포트의 전압과 출력 포트 전압의 위상차를 통해 전달되는 방향과 전력의 크기가 결정되며, 입력 전압과 출력 전압의 위상차가 90°일 때 최대 전력 전달이 되는 것을 확인할 수 있다.

그림 8은 포트 2의 전력을 500W에서 1.5kW로 급격하게 바꾸는 스텝 부하 실험 파형을 나타낸 것이다. 부하 변동에 따른 포트 2의 출력 전압이 18V(4.7%)의 언더슈트 이 있었지만, 392ms의 안정시간을 갖고 기존 출력 전압인 380V로 회복되는 것을 확인할 수 있다. 이때, 포트 3의 출력 전압과 전류는 변화가 없음을 확인할 수 있다. 이를 통해 제안한 컨버터의 전력제어 및 별도의 디커플링 알고리즘 없이 전력 디커플링을 확인할 수 있다.

그림 9는 제안한 3포트 DAB 컨버터와 기존 3포트 DAB 컨버터의 효율을 나타낸 것이다. 그림의 파란 곡선이 제안한 컨버터의 효율을 나타내며 검은 곡선은 기존 3포트 컨버터의 효율을 나타냈다. 측정 시, 한 출력 포트는 1.5kW로 고정된 상태에서 다른 출력 포트의 전력을 변화시켜 가면서 측정했다. 두 컨버터 모두 저부하

영역에선 스위칭 손실로 인해 효율이 낮으며, 고부하 영역에선 스위치의 도통 손실로 인해 최대 효율에서 낮아짐을 확인할 수 있다. 제안한 구조에선 한 출력 포트의 전력이 750W일 때 최대 효율 94.5%를 달성하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 두 시스템의 효율을 비교하면 제안한 구조의 효율이 기존 구조보다 평균적으로 1.5% 이상 높게 나온다. 이는 기존 3포트 구조와 달리 커플링 인덕터의 수가 감소함에 따라 도통손실이 줄어들게 되어 제안한 구조의 전력변환 효율이 더 높은 것으로 예상된다.

5. 결론

본 논문에서 제안한 복수 변압기를 이용한 다중포트 DAB 컨버터는 기존 다중포트 DAB 컨버터 대비 다중 권선 변압기를 사용하지 않아 고주파 변압기의 설계가 용이하다. 또한 커플링 인덕터의 수가 하나 줄어들 수 있는 구조로 줄어든 커플링 인덕터로 인해 임의의 두 출력 포트 사이의 전력 전달 경로가 형성되지 않아 별도의 전력 디커플링 알고리즘 없이 전력 디커플링을 이룰 수 있다. 분석한 성능상의 장점을 검증하기 위해 3kW급 3포트 DAB 컨버터 시작품을 제작했으며, 입력 포트와 출력 포트 사이의 전력 전달과 정상상태 성능 및 과도상태 응답을 확인하였다. 시스템의 효율은 한 출력 포트를 최대 부하인 1.5kW로 고정한 상황에서 다른 출력 포트의 출력 전력이 750W일 때 최대 94.5%의 전력 변환 효율을 확인했다. 또한, 기존 단일 변압기 구조의 3포트 컨버터 대비 높은 효율을 갖는 것을 실험을 통해 확인하였다. 그리고, 스텝 부하 실험을 통해 한 출력 포트의 부하가 바뀌더라도 다른 출력 포트의 전압에 영향을 주지 않는 출력 포트 사이의 독립 전력제어를 확인하였다.

본 연구는 한국전력공사의 2018년 착수 사외공모 기초연구 과제 연구비에 의해 지원되었음. (과제번호: R18XA06-72)

References

- [1] A. T. Elsayed, A. A. Mohamed, and O. A. Mohammed, "DC microgrids and distribution systems: An overview," *Electric Power Systems Research*, Vol. 119, pp. 407-417, Feb. 2015.
- [2] A. Pratt, P. Kumar, and T. V. Aldridge, "Evaluation of 400V DC distribution in telco and data centers to improve energy efficiency," in *INTELEC 07-29th International Telecommunications Energy Conference*,

- Rome, pp. 32-39, Oct. 2007.
- [3] S. Inoue and H. Akagi, "A bidirectional DC-DC converter for an energy storage system with galvanic isolation," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 22, No. 6, pp. 2299-2306, Nov. 2007.
- [4] M. Jain, M. Daniele, and P. K. Jain, "A bidirectional DC-DC converter topology for low power application," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 15, No. 4, pp. 595-606, Jul. 2000.
- [5] A. Alonso, J. Sebastian, D. Lamar, M. Hemando, and A. Vazquez, "An overall study of a dual active bridge for bidirectional DC-DC conversion," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE-Georgia 2010), Georgia (USA)*, Sep. 2010.
- [6] 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, May 2006.
- [7] K. P. Savitha and P. Kanakasabapathy, "Multi-port DC-DC converter for DC microgrid applications," in *2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS), New Delhi*, pp. 1-6, Mar. 2016.
- [8] C. Zhao, S. D. Round, and J. W. Kolar, "An isolated three-port bidirectional DC-DC converter with decoupled power flow management," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 23, No. 5, pp. 2443-2453, Sep. 2008.
- [9] P. Wang, X. Lu, W. Wang, and D. Xu, "Hardware decoupling and autonomous control of series-resonance-based three-port converters in DC microgrids," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 55, No. 4, pp. 3901-3914, Jul./Aug. 2019.
- [10] M. Rashidi, A. Bani-Ahmed, R. Nasiri, A. Mazaheri, and A. Nasiri, "Design and implementation of a multi winding high frequency transformer for MPSST application," in *2017 IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), San Diego, CA*, pp. 491-494, Nov. 2017.
- [11] J. Wang, A. F. Witulski, J. L. Vollin, T. K. Phelps, and G. I. Cardwell, "Derivation, calculation and measurement of parameters for a multi-winding transformer electrical model," in *APEC '99. Fourteenth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition. 1999 Conference Proceedings (Cat. No.99CH36285), Dallas, TX, USA*, Vol. 1, pp. 220-226, Mar. 1999.
- [12] N. Ekeke, J. E. Ndubah, K. White, and O. Ben, "Practical process in high frequency distribution transformer design," in *Proceedings: Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Technology Conference (Cat. No. 03CH37480), Indianapolis, Indiana, USA*, pp. 121-128, Sep. 2003.
- [13] S. Ozdemir, N. Altin, A. E. Shafei, M. Rashidi, and A. Nasiri, "A decoupled control scheme of four-port solid state transformer," in *2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Baltimore, MD, USA*, pp. 5009-5015, Oct. 2019.
- [14] 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. 1266-1273, Sep. 2016.
- [15] J. Y. Sim, J. Y. Lee, H. J. Choi, H. S. Kim, and J. H. Jung, "Decoupled power control of three-port dual active bridge DC-DC converter for DC microgrid systems," *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 23, No. 5, pp. 366-372, Oct. 2018.



김인혁(金仁赫)

1993년 12월 27일생. 2016년 경북대 전자공학부 졸업. 2020년~현재 울산과학기술원 전기전자컴퓨터공학부 석사과정.



심주영(沈周映)

1993년 1월 27일생. 2018년 영남대 전기공학과 졸업. 2020년 울산과학기술원 전기전자컴퓨터공학부 졸업(석사). 2020년~현재 LG전자 H&A사업본부 Cooking 제어개발팀 연구원.



이준영(李準營)

1993년 5월 3일생. 2016년 서강대 전자공학과 졸업. 2016년~현재 울산과학기술원 전기전자컴퓨터공학부 석·박통합과정.



정지훈(鄭智勳)

1977년 3월 2일생. 2000년 포항공대 전자전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전자컴퓨터공학부 졸업(석사). 2006년 동 대학원 전자컴퓨터공학부 졸업(공학박). 2006년~2009년 삼성전자 책임연구원. 2009년~2010년 Texas A&M University at Qatar 박사후연구원. 2011년~2012년 한국전기연구원 선임연구원. 2013년~현재 울산과학기술원(UNIST) 전기전자컴퓨터공학부 부교수. 당 학회 학술이사.