

양극성 DC 배전 시스템을 위한 고효율 전압 밸런싱 듀얼 액티브 브리지 컨버터

이민수¹, 천성문², 최동민¹, 문건우[†]

High Efficiency Voltage Balancing Dual Active Bridge Converter for the Bipolar DC Distribution System

Minsu Lee¹, Sungmoon Cheon², Dongmin Choi¹, and Gun-Woo Moon[†]

Abstract

In this study, a new voltage-balancing dual-active bridge converter that integrates a DAB converter with a voltage balancer is proposed for a bipolar DC distribution system. The proposed converter is configured to connect two loads to the transformer secondary center tap of the DAB converter, and no additional components are added. The proposed converter has the same operation as the conventional DAB converter, and it makes both output voltages similar. Moreover, the imbalanced current offset between the two loads is bypassed only on the secondary side of the transformer. Consequently, the proposed converter integrates a voltage balancer without any additional components, and no additional loss occurs in the corresponding components. Thus, high efficiency and high power density can be achieved. The feasibility of the proposed converter is verified using 3 kW prototypes under 380 V input and 190/190 V output conditions.

Key words: Dual active bridge converter, Voltage balancer, Bipolar DC distribution system, Integration circuit

1. 서 론

최근 연료전지 및 PV 시스템과 같은 DC 형태의 친환경 전력 시스템의 발전에 힘입어, 소규모 DC 분산 발전 시스템에 관한 연구들이 활발히 진행되고 있다. DC 배전 시스템은 기존 AC 배전에서 나타나는 역률 보정이나 주파수 동기화를 위한 추가적인 제어가 필요 없으며, AC 전압을 DC로 변환하는 전력변환단 자체를 없앨 수 있기 때문에 회로의 복잡도를 줄이고 전력 변환 효율을 증가시키는 측면에서 매우 큰 장점을 지닌다.^{[1]-[3]}

이러한 DC 배전 시스템 중, 그림 1에 나타난 양극성 DC 배전 시스템은 두 개의 DC 폴과 접지선으로 구성되

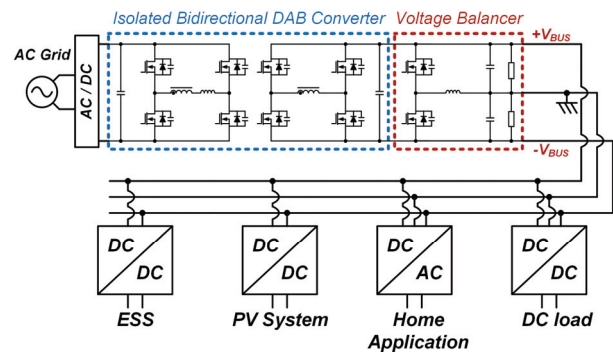


Fig. 1. Block diagram of bipolar DC distribution system.

어, 두 개의 전압 레벨로 전압 공급이 가능하기에 전력 활용에 유연성이 있으며, 하나의 DC 폴이 단락되어도 다른 폴을 통하여 전력을 공급 가능하므로 계통 안정도가 높다는 장점을 지닌다.^{[4]-[5]}

하지만 양극성 DC 배전 시스템을 구성하기 위해서는 절연을 위한 듀얼 액티브 브리지(DAB) 컨버터 이외에도, 전압 밸런서(VB)라고 불리는 추가적인 전력변환단이 필요하다.^{[6]-[10]} 이러한 VB는 양극단의 불균형한 전력 흐름에도 두 DC 전압 레벨을 동일하게 유지하는 역

Paper number: TKPE-2022-27-5-4

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

[†] Corresponding author: gwmooon@kaist.ac.kr, School of Electrical Engineering, KAIST, Korea

Tel: +82-42-350-8075 Fax: +82-42-350-8520

¹ School of Electrical Engineering, KAIST, Korea

² LM Converter project. LG Magna., Korea

Manuscript received Oct. 8, 2021; revised Nov. 12, 2021; accepted Nov. 12, 2021

- 본 논문은 2021년 전력전자학술대회 우수추천논문임

- 본 논문은 2021년 전력전자학술대회 우수논문상 수상 논문임

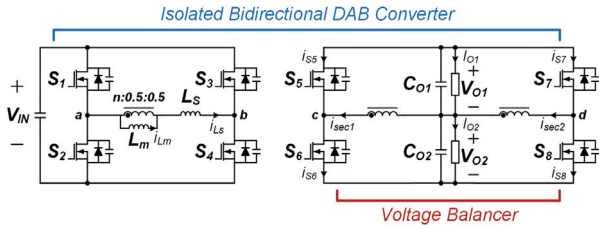


Fig. 2. Circuit diagram of the proposed converter.

할을 하며, 그림 1에 나타난 바와 같이 기본적으로는 양방향 벡 컨버터의 구조를 띤다.^[8] DAB 컨버터와 VB에 대한 연구는 최근까지도 활발히 진행되고 있으며 성능 개선이 충분히 이루어지고 있지만, 각 전력변환단을 독립적으로 사용하는 2단 전력 변환 구조는 효율과 전력 밀도의 향상에 있어 한계점을 지닌다.

이러한 한계를 극복하기 위해서 최근 DAB 컨버터에 VB를 통합하려는 연구들이 제안되었다.^{[11]-[12]} 하지만 해당 컨버터들은 여전히 큰 부피의 밸런싱 인덕터를 갖거나, 많은 수의 스위치 소자를 활용되어야 하기에, 효율과 비용, 전력 밀도의 개선에서 여전히 한계점을 갖는다.

따라서, 본 논문에서는 추가 소자 없이 VB를 DAB 컨버터에 통합할 수 있는 새로운 구조의 전압 밸런싱 듀얼 액티브 브리지 컨버터(VB-DAB) 컨버터를 제안한다. 제안하는 VB-DAB 컨버터의 회로는 그림 2에 나타나 있으며, 그 특성은 다음과 같다.

- 1) 기존 DAB 컨버터와 동일한 제어를 활용하여 양방향 전력 전송이 가능하다. 추가적인 스위칭 기법 없이도 기존 DAB의 제어 기법을 활용할 수 있다.
- 2) 부하 불균형에도 불구하고 출력 전압은 동일하게 유지된다. 따라서 밸런싱 인덕터와 같이 추가적인 소자 없이도 VB의 동작을 통합할 수 있다.
- 3) 소자 수가 이전의 연구들에 비해서 크게 감소한다. 이로 인하여 효율 및 전력 밀도가 향상된다.

2. 제안하는 회로의 동작

2.1 모드 분석

단일 위상 천이(SPS) 제어 기법을 사용하여 동작하는 VB-DAB 컨버터의 동작 파형은 그림 3과 같다. 제안하는 컨버터는 한 주기 동안 대칭으로 동작하기 때문에 스위칭 주기의 절반에 해당하는 두 가지 모드만이 설명된다. 동작 분석을 간단히 진행하기 위해, VB-DAB 컨버터의 작동에는 다음과 같은 가정이 적용된다. 1) 스위치는 내부 출력 커패시터와 바디 다이오드를 제외하고 이상적인 NMOS이다. 2) 자화 인덕턴스 L_m 은 직렬 인덕터 L_S 보다 매우 크다. 3) 두 출력전압 V_{O1} , V_{O2} 는 동일하며, V_{in} 과 $n(V_{O1}+V_{O2})$ 또한 동일하다.

모드 1 [t_0-t_1]: 해당 모드는 컨버터의 1차측 스위치가

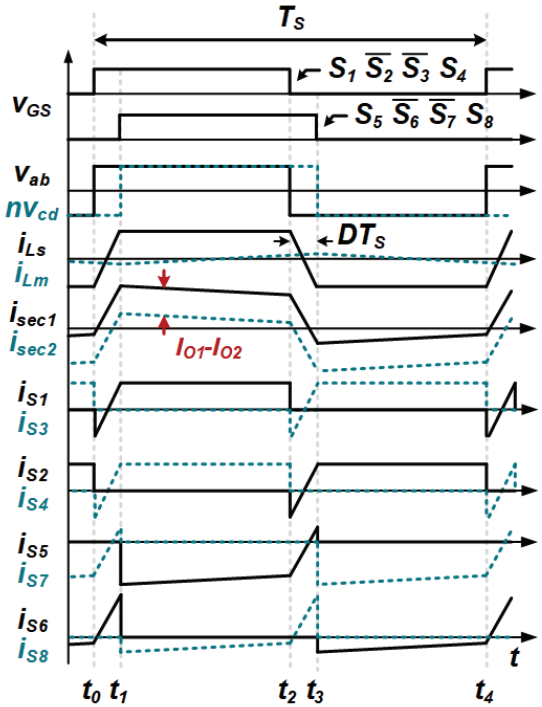


Fig. 3. Key waveforms of the proposed VB-DAB converter.

스위칭 되면서 시작한다. 이 모드에서는 v_{ab} 와 nv_{cd} 전압이 서로 반대 방향으로 L_S 에 인가되기 때문에 i_{Ls} 는 매우 가파른 기울기로 전류가 증가한다. 회로의 2차 측에서도 거의 비례하는 기울기($=n(i_{Ls}-i_{Lm})$)로 i_{sec1} 과 i_{sec2} 가 증가하지만, 두 전류는 양단 부하의 전류 차이($I_{O1}-I_{O2}$)만큼의 오프셋을 갖는다. 해당 모드가 끝나는 t_1 에서는 S_5-S_8 의 스위치는 모두 양의 전류를 가지며 해당 전류를 통하여 2차측 스위치들의 ZVS를 달성할 수 있다.

모드 2 [t_1-t_2]: 해당 모드는 컨버터의 2차측 스위치가 스위칭 되면서 시작한다. 이 모드에서는 v_{ab} 와 nv_{cd} 전압이 서로 동일한 방향으로 L_S 에 인가되기 때문에 i_{Ls} 는 0의 전류 기울기를 갖는다. 하지만 컨버터의 2차측에는 $n(i_{Ls}-i_{Lm})$ 와 동일한 기울기로 전류가 흐르기 때문에 $-ni_{Lm}$ 의 기울기를 가지며, 모드 1과 동일하게 양단 부하의 전류 차이만큼의 오프셋이 발생한다. 해당 모드가 끝나는 t_2 에서는 S_1-S_4 의 스위치는 모두 양의 전류를 가지며 해당 전류를 통하여 1차측 스위치들의 ZVS를 달성할 수 있다.

2.2 DAB 컨버터 동작

제안하는 VB-DAB 컨버터는 기존의 DAB 컨버터와 동일한 SPS 제어를 활용하여 동작한다. 제안하는 회로는 기존 DAB 컨버터와 같이 한 주기 동안 L_S 에 인가되는 입출력 전압의 크기와 위상 차이를 통해 출력으로 전달되는 전력이 결정되는데, 두 값 모두 기존 DAB 컨버터와 완전히 동일하다. 따라서 제안하는 회로는 기존 DAB와 동일한 소자 설계와 제어 기법을 활용하여 동작

TABLE 1
DESIGNED COMPONENTS OF PROTOTYPES

	Conv. 2-Stage Converter	Conv. Integrated DAB Converter ^[12]	Prop. VB-DAB Converter
I/O Spec.	Input: 380 V, Output: 190/190 V, Switching Frequency 50 kHz		
Power Switch	SCT3120AL [$\times 8$ ea] (SiC, 650 V, 0.12 Ω , 70 pF)		
Transformer	PQ5050(1 mH, 24 : 24)	PQ5050(3 mH, 24 : 24)	PQ5050(1 mH, 24 : 12 : 12)
Series Inductor	PQ3535 (80 μ H)		
Additional Switch	SCT3120AL [$\times 2$ ea] (SiC, 650 V, 0.12 Ω , 70 pF)	-	-
Balancing Inductor	CH400125($\times 2$) (740 μ H)	CH330060($\times 2$) (740 μ H) CH330060($\times 2$) (740 μ H)	-
Output Capacitor	450KXW56MEFC14.5X35 [$\times 9$ ea] (450 V, 56 $\times 9$ μ F) 250BXC56MEFC12.5X20 (250 V, 56 μ F) 250BXC56MEFC12.5X20 (250 V, 56 μ F)	250BXC56MEFC12.5X20 [$\times 9$ ea] (250 V, 56 $\times 9$ μ F) 250BXC56MEFC12.5X20 [$\times 9$ ea] (250 V, 56 $\times 9$ μ F)	

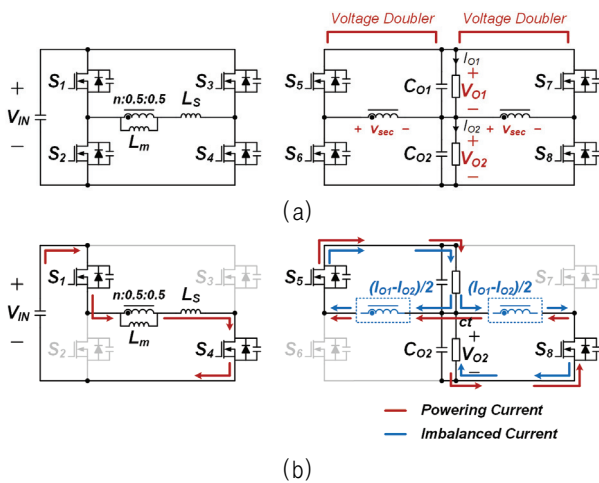


Fig. 4. Equivalent operating circuits of proposed VB-DAB converter to explain the characteristics. (a) Voltage divide (b) Treatment of unbalance load current.

이 가능하다는 장점을 지닌다.

2.3 전압 밸런서(VB) 동작

VB의 동작을 크게 두 가지로 분류하면, 1. 양단 DC 전압을 동일하게 형성하는 것과, 2. 부하의 불균형이 발생하였을 때, 해당 불균형한 DC 오프셋 전류를 재분배하는 것이다. 기존의 VB는 양방향 벽 컨버터를 활용하여 해당 동작을 수행하지만, 제안하는 VB-DAB 컨버터는 그림 4와 같이 기존 DAB 컨버터의 2차 측을 개선하여 동일한 동작을 수행한다.

그림 4(a)와 같이 제안하는 회로는 전압 더블러 정류기가 부하 양쪽으로 연결된 구조이다. 한 주기 동안 2차 측의 모든 스위치는 동일한 0.5의 듀티로 동작하기 때문에 제안하는 회로의 출력을 정확히 절반으로 분배할 수 있다. 따라서 양쪽 출력에 동일한 DC 버스 전압을 형성할 수 있다.

또한, 그림 4(b)와 같이 양쪽 출력 부하의 불균형이

나타났을 때 발생하는 DC 오프셋 전류는, 변압기의 2차 측 양단이 결합 인덕터와 같이 동작하며, 양쪽 변압기를 통해 바이패스된다. 이때 양단은 완전한 대칭 구조이므로 양쪽으로 흐르는 전류는 동일하며, 해당 전류들은 변압기 2차측에서만 바이패스된다. 따라서 바이패스되는 불균형 전류는 자화 전류의 오프셋에도 악영향을 끼치지 않으면서, 회로의 2차 측을 통해서만 흐르기 때문에 추가 소자 없이도 VB의 동작을 구현할 수 있다.

이때 부하 불균형이 심해지더라도 1차측에서 전달되는 전류와 2차측 상에서 바이패스되는 전류는 서로 독립적이므로 서로에 영향을 끼치지 않으며, 2차 전류의 오프셋 만을 발생시킨다.

3. 제안하는 VB-DAB 컨버터의 특징

3.1 전송 전력

2장에서 반복하여 언급한 바와 같이 제안하는 VB-DAB 컨버터는 기존 DAB 컨버터와 거의 유사한 동작 특성을 보인다. 이는 전송 전력의 측면에서도 동일하다. 제안하는 컨버터가 전달하는 전력은 1차측에서 2차측으로 전달되는 전류에 따라 결정이 되며 2.2 절에서 언급한 바와 같이 기존 DAB 컨버터와 동일하다. 따라서 제안하는 VB-DAB 컨버터의 전송 전력 PO는 기존 DAB 컨버터의 전송 전력과 동일하며 이는 아래와 같은 식으로 표현된다.^{[13]-[14]}

$$P_O = \frac{nV_{IN}V_O}{f_s L_S} D(1-2D), \quad (1)$$

이때 V_O 는 $V_{O1}+V_{O2}$ 로 표현되는 두 극성 전압의 합이다. 따라서 전송 전력은 듀티 D 에 따라 결정이 된다. 해당 전송 전력식은 기존 DAB 컨버터의 식과 동일하며, 0.25의 D 에서 최대 전송 전력값을 가진다. 어느쪽 스위치의 위상이 선행하는지에 따라, 전달되는 전력의 방향

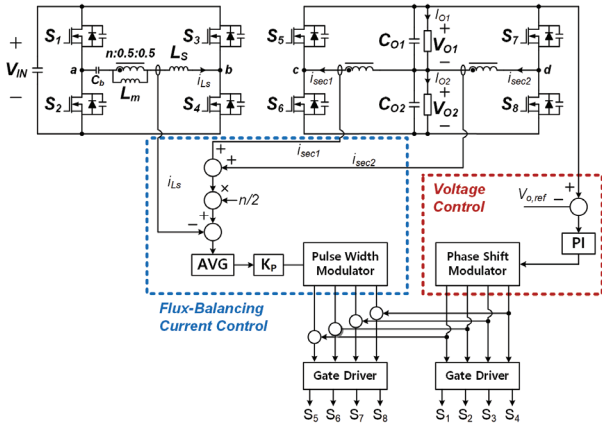


Fig. 5. Control block diagram of flux-balancing current control and voltage control.

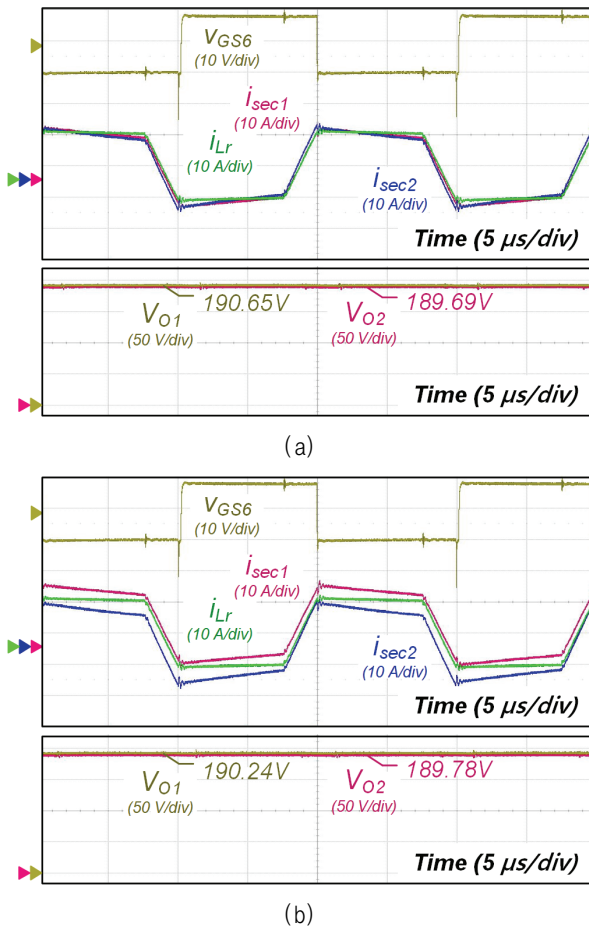


Fig. 6. Experimental key waveforms of the proposed converter (190 / 190 VO, 3 kW full load condition) (a) 50 / 50 load balance condition (b) 70 / 30 load imbalance condition.

이 바뀌는 특징을 보인다. VB-DAB 컨버터는 (1)의 식을 통하여 전체 전압 레벨과 전송 전력량을 조절한 후, 2.3절의 전압 밸런서 동작에 의해서 양극단의 전압을 동일하게 일치시킬 수 있다.

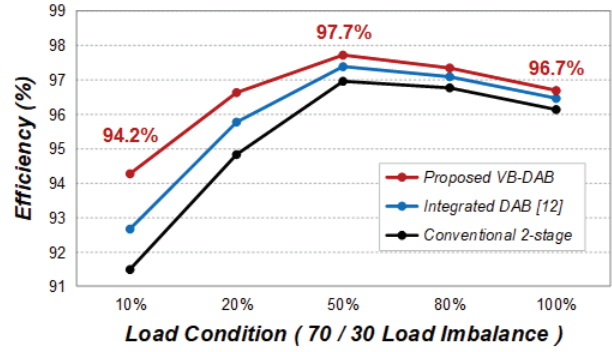


Fig. 7. Measured efficiency (70 / 30 load imbalance).

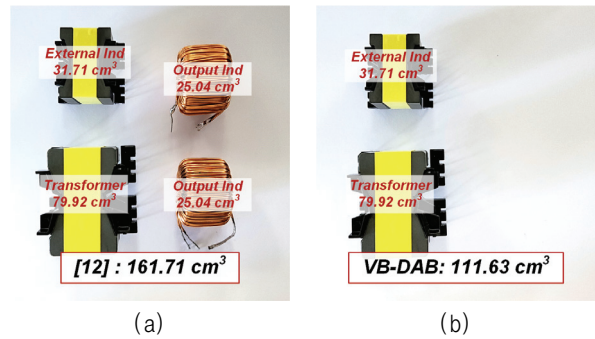


Fig. 8. Volume comparison of magnetic components (a) Enhanced DAB[12] (b) Proposed converter.

3.2 2차측 스위치의 전류 제어

제안하는 VB-DAB 컨버터는 그림 4(b)에서 나타난 바와 같이 부하 불균형에 의한 DC 오프셋 전류가 변압기를 2차측을 통해 바이패스된다. 하지만 이렇게 변압기를 지나는 DC 전류가 존재할 경우, 블로킹 커패시터가 해당 DC 전류를 차단하기 때문에, 블로킹 커패시터를 활용한 자성체 포화 방지 기법을 사용하지 못한다는 특징을 지닌다.

하지만 매우 큰 전류 스트레스를 갖는 블로킹 커패시터는 부피가 매우 크기 때문에 이를 제거하려는 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 최근에는 전류 제어를 통하여 자성체 포화 방지 기법들이 연구되고 있다.^{[15]-[17]} 따라서 본 논문에서도, 이러한 전류 제어를 활용하여 자성체의 포화를 방지하였다. 본 연구에서 적용한 전류 제어는 널리 응용되는 평균 전류 제어 기법이다. 변압기의 두 2차측 전류를 측정한 뒤, 합한 값을 1차측과 비교한 뒤 평균을 냄으로써, 자화 전류의 오프셋을 예측하고 이를 펄스폭 변조를 통하여 제어하는 기법이다.

그림 5는 제안하는 컨버터의 전체 제어 블록 다이어그램이다. 기본적인 출력 전압은 레퍼런스 전압과 비교한 후 위상 천이 제어를 통하여 조절하며, 이와는 병렬적으로 위에서 설명된 자속 포화 방지를 위한 전류 제어를 적용하여, 블로킹 커패시터 없이도 변압기의 포화를 방지한다.

4. 실험 결과

제안된 회로의 검증을 위해 380V 입력, 190/190V의 출력, 50 kHz 스위칭 주파수를 갖는 3kW 프로토타입을 통하여 실험이 진행되었다. 그림 6은 제안하는 컨버터의 실험 파형을 나타낸다. 제안하는 회로는 부하 균형 조건에서는 기존 DAB 컨버터와 동일한 동작을 수행한다. 불균형 부하 전류가 발생하는 경우, 해당 전류는 회로의 1차측에 영향을 끼치지 않으면서, 변압기 2차 측을 통해서만 바이패스되는 것을 확인할 수 있다. 또한 양쪽 출력 전압은 항상 0.5%의 오차 내에서 190V의 동일한 DC 버스 전압을 형성한다.

그림 7는 70/30 부하 불균형 조건에서의 효율을 나타낸다. 각 컨버터는 표 1의 소자를 통해 프로토타입이 제작되어 효율이 측정되었으며, 제안하는 회로는 추가적인 소자로 인한 손실이 없어, 모든 부하 조건에서 최고 효율을 달성할 수 있다. 또한, 추가 소자가 없으므로, 기존 통합 DAB 컨버터^[12]와 비교하여서도 70% 수준의 작은 자성체 부피를 달성할 수 있어 높은 전력 밀도 또한 달성할 수 있다. 따라서 제안하는 VB-DAB 회로는 이전의 회로들보다 고효율 및 고전력밀도를 달성할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 전압 밸런서를 DAB 컨버터에 통합하는 새로운 구조의 컨버터를 제안하였다. 제안하는 회로는 기존 DAB 컨버터에서 추가적인 소자 없이도 전압 밸런서의 기능을 통합할 수 있다. 따라서 추가 소자에서 발생하는 손실과 비용이 없으므로 모든 부하에서 최고 효율 달성 및 높은 경제성을 달성할 수 있다. 또한 큰 부피의 밸런싱 인덕터가 없기 때문에 높은 전력밀도 또한 달성할 수 있다. 따라서 제안하는 VB-DAB 컨버터는 양극성 DC 배전에 적용 가능한 전력 변환단으로써 매우 유용한 선택지가 될 것이며, 특히 제안하는 회로의 2차측 구조는 DAB 컨버터뿐만 아니라 다양한 토폴로지의 적용이 충분히 가능한 구조이기 때문에, 추가적인 연구 가능성 또한 제시한다.

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] J. W. Kolar and G. Ortiz, "Solid-state-transformers: Key components of future traction and smart grid systems," in *Proc. Int. Power Electron. Conf.*, Hiroshima, Japan, pp 18 - 21, May. 2014.
- [3] B. R. Shrestha, U. Tamrakar, T. M. Hansen, B. P. Bhattarai, S. James, and R. Tonkoski, "Efficiency and reliability analyses of AC and 380 V DC distribution in data centers," *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 63305-63315, Oct. 2018.
- [4] D. Kumar, F. Zare, and A. Ghosh, "DC microgrid technology: system architectures, AC grid interfaces, grounding schemes, power quality, communication networks, applications, and standardizations aspects," *IEEE Access*, Vol. 5, pp. 12230-12256, Jun. 2017.
- [5] H. Kakigano, Y. Miura, and T. Ise, "Low-voltage bipolar-type dc microgrid for super high quality distribution," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 25, No. 12, pp. 3066 - 3075, Dec. 2010.
- [6] B. Zhao, Q. Song, W. Liu, and Y. Sun, "Overview of dual-activebridge isolated bidirectional dc - dc converter for high-frequency-link power-conversion system," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 29, No. 8, pp. 4091 - 4106, Aug. 2014.
- [7] 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," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 35, No. 3, pp 3148-3172. Mar. 2020.
- [8] F. Wang, Z. Lei, X. Xu, and X. Shu, "Topology deduction and analysis of voltage balancers for DC microgrid," *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, Vol. 5, No. 2, pp. 672 - 680, Jun. 2017.
- [9] X. Zhang, and C. Gong, "Dual-buck half-bridge voltage balancer," *IEEE Trans. Industrial Electron.*, Vol. 60, No. 8, pp 3157-3164, Aug. 2013.
- [10] X. Zhang, C. Gong, and Z. Yao, "Three-level DC converter for balancing DC 800-V voltage," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 30, No. 7, pp 3499-3507, Jul. 2015.
- [11] J. Y. Lee, Y. P. Cho, and J. H. Jung, "Single-stage voltage balancer with high-frequency isolation for bipolar LVDC distribution system," *IEEE Trans. Industrial Electron.*, Vol. 67, No. 5, pp. 3596 - 3606, May. 2020.
- [12] J. Y. Lee, H. S. Kim, and J. H. Jung, "Enhanced dual-active-bridge DC-DC converter for balancing bipolar voltage level of DC distribution system," *IEEE Trans. Industrial Electron.*, Vol. 67, No. 12, pp. 10339 - 10409, Dec. 2020.
- [13] C. Mi, H. Bai, C. Wang, and S. Gargies, "Operation, design and control of dual H-bridge-based isolated bidirectional dc-dc converter," *IET Power Electron.*, Vol. 1, No. 4, pp. 507 - 517, Apr. 2008.
- [14] Bai, H., Mi, C. "Eliminate reactive power and increase system efficiency of isolated bidirectional dual-active-bridge DC-DC converters using novel dual-phase-shift control," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 23, No. 6, pp 2905 - 2914, Nov. 2008.
- [15] Z. Wang, J. Chai, and X. Sun, "Method to control flux balancing of high frequency transformers in dual active

bridge dc - dc converters," *J. Eng.*, Vol. 2018, No. 17, pp. 1835 - 1843, 2018.

- [16] Y. Panov, M. M. Jovanovic, and B. T. Irving, "Novel transformer-fluxbalancing control of dual-active-bridge bidirectional converters," in *Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo.*, pp. 42 - 49, Mar. 2015.
- [17] K. H. Andersen, M. Nymand, "Digital estimating and balancing of transformer magnetizing current in an isolated full bridge converter," in *Proc. 2018 IEEE Southern Power Electron. Conf.*, pp. 1 - 6, Apr. 2018.

이민수(李玟洙)



1993년 3월 2일생. 2017년 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 졸업. 2017년~현재 동 대학원 전기 및 전자공학부 석박통합과정.

천성문(千成文)



1994년 12월 22일생. 2020년 인하대 전기공학과 졸업. 2022년 한국과학기술원 전기 및 전자 공학부 졸업(석사). 2022년~현재 LG Magna 연구원.

최동민(崔東愨)



1996년 4월 2일생. 2019년 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 졸업. 2021년 동 대학원 전기 및 전자공학부 졸업(석사). 2021년~현재 동 대학원 전기 및 전자공학부 박사과정.

문건우(文建又)



1966년 10월 3일생. 1990년 한양대 전자공학과 졸업. 1992년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기 및 전자공학과 졸업(공박). 2000년~현재 한국과학기술원 교수.