

LVDC용 3상 Dual Active Bridge 컨버터의 효율 개선을 위한 설계 방법

최현준, 이원빈, 이준영, *조영표, 정지훈

울산과학기술대학교 (UNIST), *한국전력연구원 (KEPCO Research Institute)

Design Consideration for Efficiency improvement of Three-Phase Dual Active Bridge Converter in LVDC Applications

Hyun Jun Choi, Wonbin Lee, Junyoung Lee, *Youngpyo Cho, Jee Hoon Jung

Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)

*KEPCO Research Institute

ABSTRACT

본 논문에서는 수학적 모델링과 성능 분석을 통해 LVDC 용 3상 Dual Active Bridge (DAB) 컨버터의 효율을 증가시킬 수 있는 다양한 방법에 대해서 제안하고자 한다. 3상 DAB 컨버터의 경우 양방향 전력 변환을 필요로 하는 고전력 응용에서 많이 사용되고 있다. 이는 3상 DAB 컨버터가 영전압 스위칭이 가능할 뿐만 아니라, 단상 DAB 컨버터 대비 낮은 도통 손실을 가질 수 있기 때문이다. 고전압/고전류 응용의 경우 대부분 능동 소자로 IGBT가 사용되는데, 따라서 대전력 응용에서 3상 DAB 컨버터의 영전압 스위칭이 가능한 장점을 퇴색시키고, 높은 스위칭 손실을 야기한다. 뿐만 아니라 3상 DAB 컨버터의 경우 고부하 상태에서 높은 순환 전류로 인해 도통 손실이 증가한다. 따라서 본 논문에서는 상기의 단점을 극복하기 위하여 IGBT의 턴 오프 전류를 최소화 시키고, RMS 전류를 낮출 수 있는 설계 방법을 제안하고자 한다. 모의시험과 5 kW급 시제품을 이용한 실험결과를 통해 제안하고자 하는 설계 방법의 타당성을 검증하고자 한다.

1. 서론

최근 DC 마이크로 그리드가 전력 과정의 최소화 등으로 인해 높은 효율을 낼 수 있기 때문에 AC 그리드 전력 배분 시스템의 대안으로 활발히 연구되고 있다. Low voltage direct current (LVDC)는 DC 마이크로 그리드를 구성하는데 필수적인 시스템으로 기존의 AC 배전에 비해서 높은 질을 제공할 수 있다. 따라서 LVDC 컨버터는 고전압 (kV)을 상용 전압으로 바꿀 수 있어야 하기 때문에, 높은 전압을 견딜 수 있어야 하며 양방향성이 가능해야 한다.^[1] 고전압 응용 및 양방향 컨버터 중 적절한 토폴로지는 Dual Active Bridge (DAB) 컨버터가 있다. DAB 컨버터는 영전압 스위칭이 가능하고 양방향 전력 변환이 간단하다는 장점을 가지고 있다. 특히 3상 DAB 컨버터의 경우, 단상 DAB에 비해서 수동 소자의 크기를 줄일 수 있으며, 도통손실이 작아 높은 전력의 응용분야에 적용할 수 있다는 장점이 있다.^[2]

고전압/고전류의 응용에서는 내구성의 문제로 인해서 IGBT가 반도체 소자로 주로 사용된다. IGBT의 경우 턴 오프 전류로 인한 스위칭 손실이 크기 때문에, DAB 컨버터의 장점인 영전압 스위칭의 효과가 작다. 단상 DAB 컨버터의 경우 영전류 스위칭을 만족시키기 위하여 Triangular/Trapezoidal 방법 등

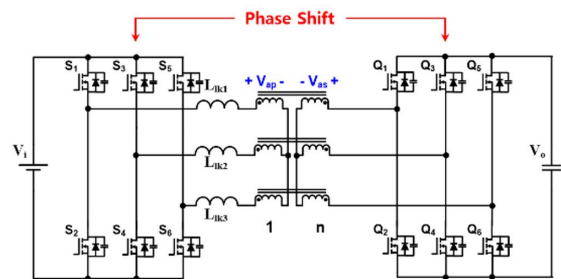
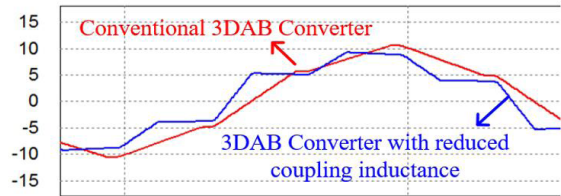
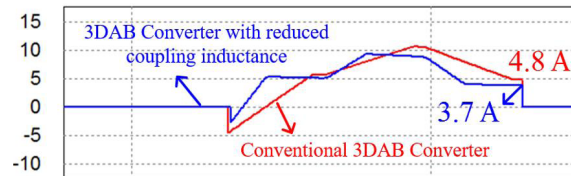


그림 1. 3 상 Dual Active Bridge DC DC 컨버터



(a)



(b)

그림 2. 5 kW 부하조건에서 일반적인 인덕턴스와 제안하는 인덕턴스 설계 시 3상 DAB 컨버터 시뮬레이션 파형: (a) 인덕터 전류, (b) 스위치 전류

다양한 스위칭 방법이 제안되어왔다. 하지만 3상 DAB 컨버터의 경우 각각의 상이 이미 120도 차이로 떨어져 있기 때문에 추가적인 스위칭 패턴을 적용하면 제어의 복잡성이 매우 증가하고, 상간의 불균형을 초래한다.

본 논문에서는 기존의 제어 방법을 유지하면서 수학적 모델을 기반으로 컨버터의 설계 방법을 제시하여 스위칭 손실과 도통 손실을 줄이고자 한다.

2. 컨버터 설계 방법

그림 1은 3상 DAB 컨버터의 회로를 나타낸다. 3상 DAB 컨버터에는 단상 DAB와 동일하게 출력단은 두 양단의 브릿지

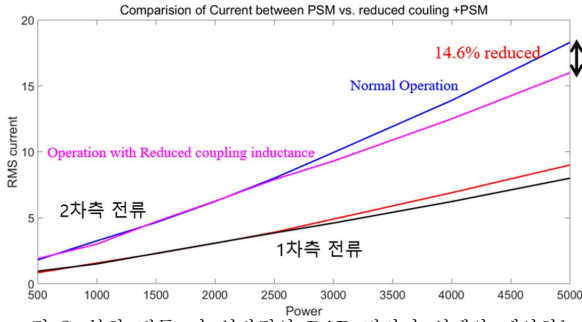


그림 3. 부하 변동 시 일반적인 DAB 컨버터 설계와 제안하는 DAB 컨버터 설계 시 RMS 전류 차이의 시뮬레이션 결과

버터에는 단상 DAB와 동일하게 출력단은 두 양단의 브릿지 전압 차이에 의해서 제어되고, 결합 인덕턴스가 에너지를 전달하는 역할을 한다. 인덕터 전류의 분석을 통해서 전달되는 전력과 전류의 RMS를 구하면 수식 (1)과 (2)로 나타낼 수 있다.

$$P(\phi) = \frac{nV_{\in}V_O}{wL}\phi\left(\frac{2}{3} - \frac{\phi}{2\pi}\right), n = \frac{N_2}{N_1} \quad (1)$$

$$I(\phi) = \frac{\sqrt{V_{\in}V_O(5(n-1)^2\pi^2 + n54\pi\phi^2 - n27\phi^3)}}{9\sqrt{3}wL} \quad (2)$$

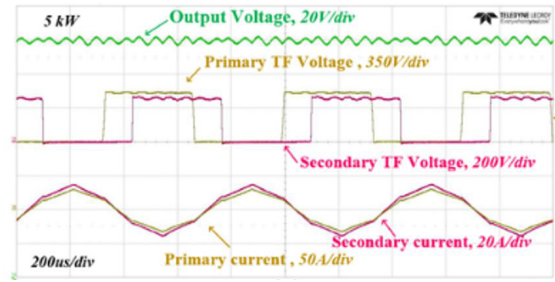
그림 2는 5 kW 부하 조건에서 인덕턴스의 크기를 달리 하였을 때 인덕터 전류와 스위칭 전류를 보여준다. 일반적으로 커플링 인덕턴스의 설계는 수식 (1)을 기반으로 하여 최대의 위상 전이일 때에 여유를 두고 설계한다. 만약 커플링 인덕턴스가 줄어들게 되면 고부하의 경우 피크 전류가 감소하게 되고, 이는 RMS 전류를 낮추게 되어 결과적으로 도통손실을 감소시킨다. 뿐만 아니라 스위치 전류의 입장에서 턴 오프 시 전류의 크기도 감소시킬 수 있기 때문에 스위칭 손실도 감소시킨다. 3상 DAB 컨버터의 경우 일반적인 인덕턴스 설계에 비하여 인덕턴스를 줄여 설계하게 되면 Zero Vector의 영역이 늘어나고 전류의 피크가 줄어들기 때문이다. 하지만 그림 2와 3에서 보는 것처럼 인덕터를 줄이더라도 경부하 시 RMS 전류의 경우 거의 차이가 없으며, 너무 작은 인덕턴스를 사용하면 오히려 ZVS 영역이 줄어들게 만들어 DAB 컨버터의 강점인 소프트 스위칭의 효과가 사라지기 때문에 경부하 시 효율이 감소한다. 도통 손실과 스위칭 손실을 고려하여 최적 인덕턴스의 설계가 필요하다.

4. 실험 결과

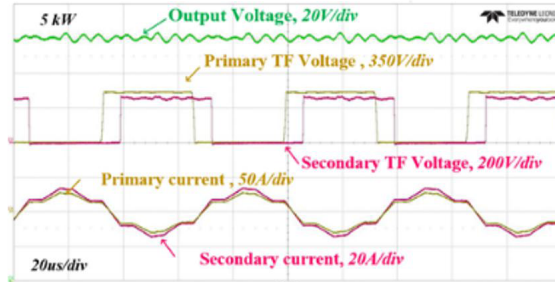
3상 DAB 컨버터의 입력전압은 500 V출력전압은 252 V이며 스위칭 주파수는 15 kHz로 설정하였다. Δ Y 결합과 비교하여 상대적으로 각 상간의 불균형이 적고 무효전력을 최소화 할 수 있는 Y Y 결합 구조의 변압기를 3상 컨버터에 적용하였다. 본 논문에서는 도통 손실과 스위칭 손실을 고려하여 140 μH를 결합 인덕턴스로 설정하였다. 그림 3은 동일한 부하 조건에서 일반적인 DAB 컨버터 설계일 때 와 최적 인덕턴스를 적용한 DAB 컨버터 설계 시의 실험 파형을 보여준다. 일반적인 3상 DAB 컨버터 설계 시 5 kW에서 약 56.7도 위상차가 있지만, 최적 인덕턴스를 고려했을 때 5 kW에서 약 35.5도의 위상차를 보이는 것을 알 수 있다.

그림 4는 500 W부터 5 kW 까지 부하를 증가시키면서 일반적인 DAB 컨버터 설계 시와 제안하는 DAB 설계 시 효율을 비교한 그래프이다. 5 kW에서 일반적인 3상 DAB 컨버터의 효율은 89%로 측정되었고, 제안한 컨버터의 효율은 90.7%로

측정되어 총 약 1.7% 효율이 증가하였다.



(a)



(b)

그림 4. 5 kW 시 3상 DAB 컨버터 실험 비교 파형: (a) 일반적인 3상 DAB 컨버터 (b) 제안하는 컨버터

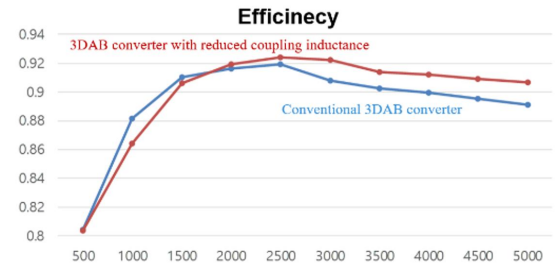


그림 5. 3상 DAB 컨버터 효율 비교 그래프

그림 5에서 보인 것처럼, 경부하에서 스위칭 손실이 상대적으로 커 보이기 때문에 제안한 DAB 컨버터의 효율이 낮으나, 중부하 이후 제안한 DAB 컨버터의 효율이 일반적인 방법으로 설계한 DAB 컨버터보다 전체적으로 높은 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 3상 DAB 컨버터의 효율을 증가시키는 방법을 제시하였다. 기존의 3상 DAB 컨버터 효율을 증가시키기 위해 DAB 컨버터의 인덕터 설계방법을 수학적 분석을 통해 제시하고 5 kW급 시제품을 제작하여 성능을 확인하였다.

이 논문은 한국전력공사 전력연구원에서 수행중인 “저압직류배전망 독립성 실증 연구” 과제의 지원에 의하여 연구되었음(D3080)

참고 문헌

- [1] G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans, and W. D'haeseleer, “Distributed generation: Definition, benefits and issues,” Energy Policy, vol. 33, no. 6, pp. 787–798, 2005
- [2] R. W. A. A. De Doncker, D. M. Divan, and M. H. Kheraluwala, “A three phase soft switched high power density DC/DC converter for high power applications,” Industry Applications, IEEE Transactions on, vol. 27, pp. 63–73.