

가상 직접 전력 제어를 이용한 듀얼 액티브 브리지의 전류 제어에 대한 연구

강자윤, 이상택, 신덕식
전자부품연구원

A Study on Current Control of Dual Active Bridges Using Virtual Direct Power Control

Ja-Yoon Kang, Sang-Taek Lee, Duck-Shick Shin
Korea Electronics Technology Institute

ABSTRACT

전세계적으로 신재생에너지 연구가 개발되면서 DC 마이크로 그리드가 빠르게 확산되고 있다. DC 마이크로 그리드에는 ESS가 필수적으로 적용되는데, ESS 충방전을 위해 양방향 및 절연 기능이 포함된 토폴로지가 적용되어야 한다. 최근에는 절연형 양방향 컨버터로 듀얼 액티브 브리지 토폴로지가 제어에 대한 연구와 함께 많이 적용되어지고 있다. DC 마이크로 그리드에는 여러 DC-DC 컨버터로 구성되어 있어 상위 제어기에서 전류지령 값을 통해 전류제어로 운영된다. 본 논문에서는 가상 직접 전력 제어를 이용하여 빠른 응답을 구현하는 전류제어를 제안하였다. 검증 방법으로는 시뮬레이션을 통해 검증 하였다.

1. 서론

DC 마이크로 그리드 장점은 DC로 발전되어 DC 부하로 이용되기 때문에 기존 AC 계통 시스템보다 효율이 좋고, 고주파수 동작으로 전력밀도에도 유리한 장점을 지니고 있다. DC 계통은 주로 태양광, ESS, 부하 등으로 이루어져 있는데 ESS의 충방전을 위한 컨버터는 절연과 양방향 기능이 요구된다. 이에 적합한 토폴로지는 Dual Active Bridges(DAB)가 대표적이다. DAB는 위상천이 방법에 따라 여러 제어 방법이 있고, 효율적인 제어를 위해 다양한 연구가 많이 진행되고 있다.^[1] 보통 DAB 연구의 추세는 효율을 증가시키기 위한 ZVS 범위 또는 제어에 대한 연구와 공진을 이용한 토폴로지 연구들이 대부분이다. 최근엔 DC 마이크로 그리드에 많이 적용되고 있어, 이에 대한 모델링과 제어에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.^[2] DC 마이크로 그리드는 Power Management System(PMS)에서 전류 지령 값을 통해 시스템을 운영하는 방법으로 이에 대한 연구는 미비하다. 또한, 과도상태에서 빠른 응답속도를 위한 제어 방식으로 전압제어에 대한 연구는 많이 진행되었지만 전류 제어에 대한 연구는 미비하다.^[3] 본 논문에서는 가상 직접 전력 제어를 이용한 전류제어 방식을 제안하였다. 본 논문에서는 제안하는 제어 방식에 대하여 설명하고, Phase-Shift Ratio Formula를 설명하였다. 시뮬레이션으로 효과를 검증하였다.

2. 본론

2.1 제안한 제어 방식

그림 1은 DAB의 토폴로지와 Single Phase Shift(SPS)의 주

요 특성 파형과 가상 직접 전력 제어도를 나타낸 것이다. 입력과 출력은 배터리와 DC 계통으로 되어 있으며 출력측은 DC 계통 전압으로 제어가 되고 있어, 제안한 시스템에서는 전류 제어로 구성하였다.

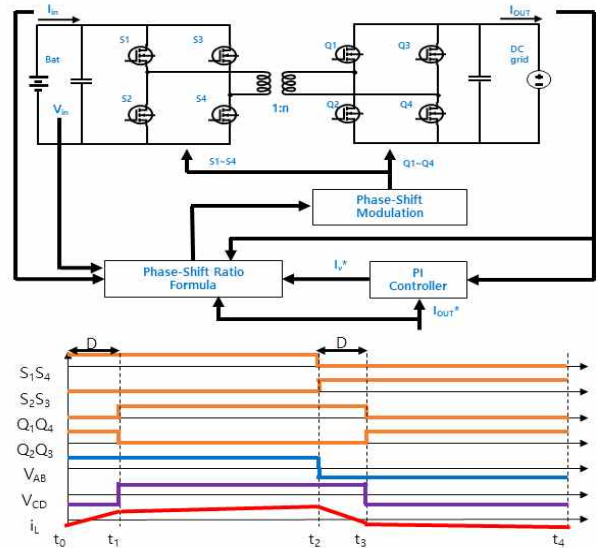


그림 1 SPS modulation에 제안한 가상 직접 전력 제어를 적용한 제어도

Fig. 1 Proposed control scheme using virtual direct power control in SPS modulation

직접 전력 제어를 이용한 방법은 원하는 출력 전력에 즉시 도달 할 수 있게 제어하여 우수한 동적 성능이 달성 될 수 있도록 하는 방법이다. 따라서, 원하는 출력 전력 요건을 충족시키기 위해, 입력 전력과 출력 전력 사이의 관계가 설명 되어야 한다. 가상 직접 전력 제어 방식은 컨버터 내의 전력 손실로 인한 전력 차이를 보상하기 위해 가상 전력 제어를 채택하였다. 그림 1에서 I_v^* 는 원하는 가상 출력 전류이며, PI 제어기의 출력 값이다. 여기서 PI 제어기는 시스템 안정성을 위한 제어기가 아닌 계산 모델과 실제 시스템간의 차이를 보상하기 위해 사용되었다. 그리고 PI 제어기 결과와 함께 I_{in} , I_{out} 을 이용하여 Phase-Shift Ratio Formula를 통해 D 값을 산출한다. 여기서 D 값은 변압기 1차측과 2차측의 전압 위상 차이를 말한다.

2.2 Phase-Shift Ratio Formula

Phase-Shift Ratio Formula은 앞서 설명하였듯이 입력 전송

전력과 출력 전력 사이의 관계에 의해서 결정된다. 식 (1)은 SPS 제어 방식에서 얻을 수 있는 송신전력이다. 식 (2)는 가상 전력을 출력 전압, 전류와 원하는 전류 값과 PI 제어기 출력 값으로 나타낸 식이다. 원하는 제어 결과는 $P=P^*$ 이기 때문에 식 (1)과 식 (2)를 D에 대해 정리하면 식 (3)과 같이 Phase-Shift Ratio를 구할 수 있다.

$$P = \frac{V_{in} V_o D(1-D)}{2} \quad (1)$$

$$P^* = \frac{I_{V_{out}}^* V_{out}}{I_{out}} \quad (2)$$

$$D = \begin{cases} \frac{1}{2} - \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{2I_{V_{out}}^* I_{out}}{I_{out} V_{in}}} & (I_{out} \geq 0) \\ -\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{2I_{V_{out}}^* I_{out}}{I_{out} V_{in}}} & (I_{out} < 0) \end{cases} \quad (3)$$

2.3 Simulation Result

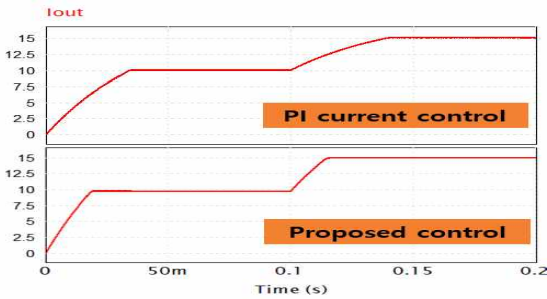


그림 2 전류 제어 결과 파형 비교
Fig. 2 Compare of current control result waveform

그림 2는 PI 전류 제어와 제안한 방식의 제어 결과의 출력 전류 파형이다. 시뮬레이션은 초기 전류 지령 값을 10A로 하고 0.1초 후에 15A로 변경하였을 때 두 제어 방법 모두 지령값에 도달은 하였으나, 제안한 제어방법이 동적응답 속도가 약 3배 정도 빠른 것을 확인 할 수 있다.

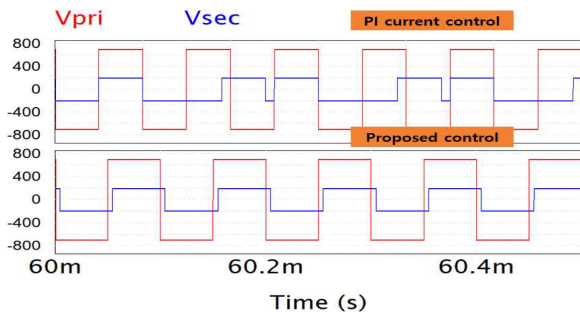


그림 3 변압기 1차, 2차 전압 파형
Fig. 3 Primary and secondary voltage of transformer

그림 3은 변압기 1, 2차측의 전압 파형의 결과로 제안한 제어 방식이 SPS 주요 특성 파형에 가깝게 D를 제어함에 있어 더욱 안정됨을 확인할 수 있다. 그림 4는 변압기의 입출력 전압, 전류 파형이다. PI 제어의 경우 입출력 파형의 효율은 약 81%이며, 제안한 제어의 효율은 약 97%이다. 이 결과로 제안한 제어 방식이 속응성, 안정성, 효율 등에 유리함을 확인하였다.

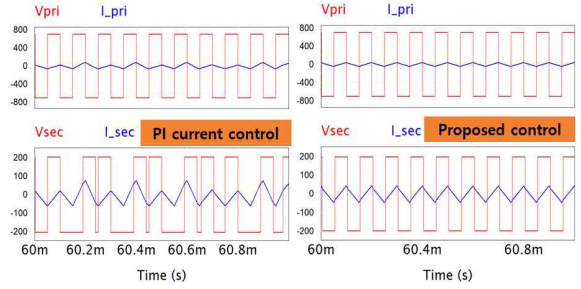


그림 4 변압기 입출력 전압, 전류 파형
Fig. 4 Input/Output voltage and current of transformer

3. 결론

본 논문에서는 DC 마이크로 그리드에서 사용되는 컨버터의 전류제어에 있어서 빠른 응답속도를 해결하고자 제어기를 제안하였다. 제안한 제어기는 가상 직접 전력 제어 방식으로 원하는 출력 전력에 즉시 도달하는데 있어서 우수한 동적 성능을 얻기 위해 채택한 방법이다. 이 제어에 있어서 중요한 점은 Phase-Shift Ratio Formula를 유도하는데 있다. 이 공식은 최적의 D를 구하기 위해 가상 전력과 실제 전력의 통합으로 유도된 공식이다. 이 공식의 장점은 인덕터, 스위칭 주파수, 변압비와 같은 파라미터에 영향을 받지 않고, 입출력 전압, 전류만을 이용하는 점이다. 이로 인해 실제 파라미터의 오차로 인한 제어의 오차는 발생하지 않는다. 또한, 직접 전력 제어가 아닌 가상 직접 전력 제어를 사용함으로써 실제로 소모되는 전력차이를 보상하기 때문에 입력 전력과 출력 전력의 오차에 대한 보상을 따로 할 필요가 없다. 그리고 시뮬레이션 결과를 비교한 결과 응답 속도에서 약 3배 빠른 특성을 보였다. 또한, 정상 상태에서 출력 안정성 및 효율 향상 측면에서 강점을 보인 것을 확인하였다. 이 제어기는 DAB에서 SPS modulation만 해당되는 제어기이며, 다른 modulation의 경우 출력에 관한 식이 다르기 때문에 Phase-Shift Ratio Formula이 변경된다.

이 논문은 2020년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(연안선박용 가스연료 Hybrid 전기추진시스템 안전 및 적용 기술개발)

참고 문헌

- [1] Nie Hou, Yun Wei Li, "Overview and Comparison of Modulation and Control Strategies for a Nonresonant Single-Phase Dual-Active-Bridge DC-DC Converter", IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, Vol. 35, No. 3, pp. 3148-3171, 2020, March.
- [2] Jacob A. Mueller, Jonathan W. Kimall, "Modeling Dual Active Bridge Converters in DC Distribution Systems", IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, Vol. 34, No. 6, pp. 5867-5879, 2019, June.
- [3] Wensheng Song, Nie Hou, Mingyi Wu, "Virtual Direct Power Control Scheme of Dual Active Bridge DC-DC Converters for Fast Dynamic Response", IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, Vol. 33, No. 2, pp. 1750-1759, 2018, February.