

분산형 제어구조를 갖는 단상 반도체 변압기

이성민, 조영훈
 전국대학교 전력전자연구소

Single-phase SST with Distributional Control Structure

Sungmin Lee, Younghoon Cho
 Power Electronics Lab., Konkuk Univ.

ABSTRACT

반도체 변압기는 배전단 및 전기 철도용 변압기 등 기존의 변압기를 대체하기 위한 전력전자 기술의 대표적인 예다. 최근의 경우, 신재생 에너지원 사용량 및 효율성 증대 목적에 따라 반도체 변압기 또한 스마트 그리드 상용화 등 다양한 미래 기술의 상용화 방안의 일환으로 그 중요성이 커지는 추세이다. 일반적으로 반도체 변압기는 높은 입력전압에 대응하기 위해 여러 모듈이 결합되어 하나의 시스템을 구성하는 모듈형 구조로 구성된다. 각 모듈은 교류 전원을 직류로 변환하기 위한 AC/DC부와 그 출력이 연결되어 출력 전압을 구성하는 절연형 DC/DC부로 구성된다. 각 모듈의 AC/DC부의 입력은 직렬로 연결되어 직렬형 멀티레벨 컨버터로 동작하며, 절연형 DC/DC부의 출력은 병렬로 연결되어 DC 전원을 출력한다. 통상적인 반도체 변압기의 경우 동작함에 있어 제어 변수의 공유를 위한 고속 통신 회로가 요구되며, 이는 시스템의 복잡성과 단가 상승에 직접적인 영향을 끼친다. 본 논문에서는 고속 통신 없이 모듈간 전력 및 전압 밸런싱이 가능한 반도체 변압기의 분산형 제어 구조를 제안한다. 설계된 제어기는 모의실험을 통해 동작을 검증하였다

1. 서론

전세계적으로 태양광, 풍력과 같은 친환경 분산 에너지원의 사용량이 증가하고 있는 추세이다. 이러한 분산 에너지원은 기존의 화석연료와 발전기 기반으로 구성된 에너지원과 달리 친환경적으로 지속 가능한 에너지 시스템을 구성할 수 있다는 장점이 있으나, 발전의 불안정성으로 인해 사용성이 떨어지며 이는 계통 품질의 저하로 이어지게 된다. 예를 들어, 발전량과 소비량이 크게 일치하지 않는 경우 계통의 전압이나 주파수 변동 등의 문제가 발생한다. 이러한 현상을 완화하기 위한 방법으로 분산 에너지원의 출력을 크게 제한하거나, ESS 등의 추가적인 장치를 이용해 계통의 안정성을 높이는 방법이 있다. 하지만 분산 에너지원의 출력이 제한되는 경우에는 분산 에너지원 자체의 효율이 크게 떨어지며, 추가적인 장치를 이용하는 경우 설치 비용에 따른 경제성 하락의 우려가 있다. 추가적으로, 분산 에너지원의 사용량이 증가함에 따라 기존 에너지원을 계통의 안정화를 위해 사용되는 경우가 있으나 그 한계가 분명하다. 반도체 변압기는 전통적인 변압기를 대체함으로써 이러한 문제의 해결이 가능하다.

반도체 변압기는 배전단 혹은 그 이상의 계통에 직접적으로 접속하여 낮은 전압으로 변환해 출력한다. 그림1은 본 논문의 반도체 변압기 단일 모듈의 구조를 나타내며, 그림2는 그림1의 모듈 M개를 이용하여 반도체 변압기를 구성시의 모습을 나타낸다. 단일 모듈의 경우 교류의 전압을 직류로 변환하는 AC/DC부와 절연된 출력을 만드는 절연형 DC/DC 부의 2단 구성으로 이루어진다. 구성에 따라 다르지만 대체로 반도체 변압기는 높은 계통 전압에 대응하기 위해 다수의 모듈을 이용하여 계통에 연결되는 입력부는 직렬로, 저 전압을 출력하는 출력부는 병렬로 연결하여 전체 시스템이 구성된다. 본 논문의 반도체 변압기는 AC/DC부의 경우 풀 브리지 컨버터, 절연형 DC/DC 부는 DAB컨버터를 이용하여 구성하였다. V_g 와 V_o 는 순서대로 계통전압과 개별 모듈 입력 전압을, V_{dc} 와 V_o 는 개별 모듈 DC링크 전압과 시스템 출력 전압을 의미한다.

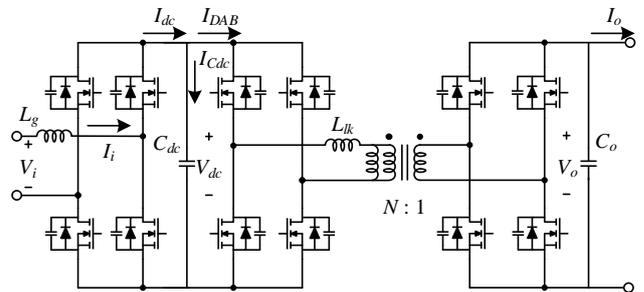


그림1 반도체 변압기 단일 모듈 구조
 Fig.1 Structure of single module in solid state transformer

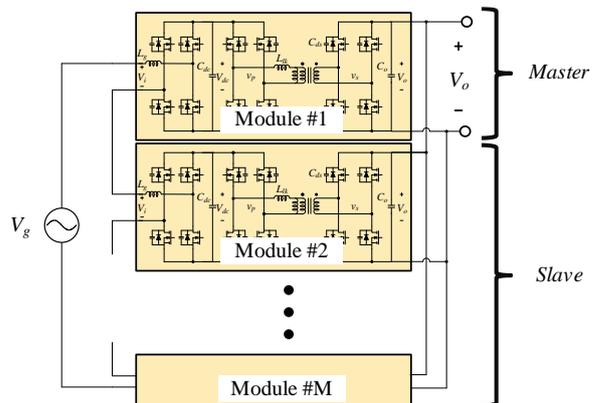


그림1 단상 반도체 변압기 전체 구조
 Fig.1 Entire structure of single phase solid state transformer

2. 단상 반도체 변압기의 분산형 제어기 설계

2.1 AC/DC부 제어기 설계

그림3은 멀티레벨 컨버터를 구성하는 풀 브리지 컨버터의 소신호 모델이다. 앞절에서 설명하였듯, 각 모듈의 풀 브리지 컨버터는 직렬로 연결되어 하나의 멀티레벨 컨버터로 동작하게 되나 해당 모듈의 역할이 마스터 또는 슬레이브로 나눠짐에 따라, 제어 구조 또한 다르게 동작한다. 먼저, 그림4는 마스터 모듈 AC/DC 컨버터의 제어 블록도를 나타낸다. 마스터 모듈은 DC링크 전압을 유지하기 위한 전압제어기의 내부에 입력 전류를 제어하는 전류제어기가 직렬로 연결된 이중루프 제어기로 구성된다. 이때, G_{vc} , G_{cc} 는 각각 전압제어기와 전류제어기를 의미하며, G_{VdcD} 는 컨버터의 듀티-출력전압 전달함수를 의미한다.

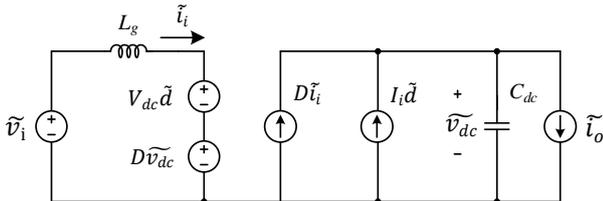


그림3 AC/DC 컨버터 소신호모델
Fig.1 Small signal model of isolated DC/DC converter

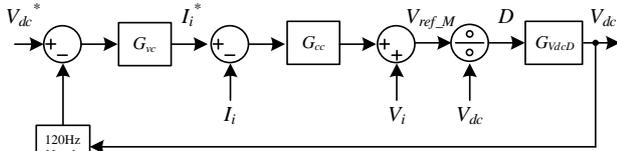


그림4 마스터 모듈 AC/DC 컨버터 브리지 제어 블록도
Fig.1 Control block diagram of master module AC/DC converter

그림 5는 슬레이브 모듈의 AC/DC 컨버터 제어 블록도를 나타낸다. 본 논문의 제어 구조는 고속 통신으로 마스터 모듈의 듀티를 공유받지 않기에, 전체 계통 전압을 모듈 개수로 나눈 만큼의 전압을 개루프로 출력한다. 따라서 $V_{ref,S} = V_g/J$ 의 관계가 성립한다.

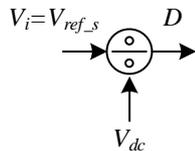


그림5 슬레이브 모듈 AC/DC 컨버터 제어 블록도
Fig.1 Control block diagram of slave module AC/DC converter

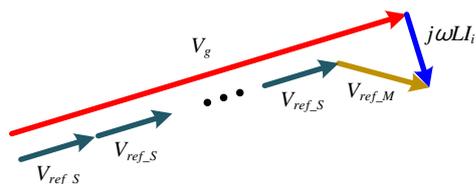


그림6 AC/DC 부 직렬 연결 시 전압 벡터 도
Fig.6 Voltage vector diagram of cascaded AC/DC converter

전체 컨버터가 동작하는 경우 모듈의 AC/DC 컨버터가 출력하는 전압을 벡터도로 표현하면 그림 6과 같다. $V_{ref,S}$ 는 V_g 와 같은 방향으로 쌓여 있으며, 마스터 모듈에서는 I_i 만큼의 전류를 제어하기 위한 성분과 $V_{ref,S}$ 가 합쳐진 $V_{ref,M}$ 만큼의 전압을 출력한다. 역률이 1로 동작하는 경우, 마스터와 슬레이브가 다른 전압 벡터를 출력하고 있지만 각 모듈에 입력되는 전력은 동일하게 유지된다.

2.2 절연형 DC/DC부 제어기 설계

그림7은 모듈 내 절연형 DC/DC 컨버터로 사용된 DAB 컨버터의 소신호 모델이며, 그림 8은 제어 블록도를 나타낸다. 절연형 DC/DC 컨버터는 그 출력이 병렬로 연결되어 전체 시스템 출력 전압을 구성한다.

그림8의 G_{vc} 는 전압제어기를, $G_{Vo\phi}$ 는 컨버터의 듀티-출력전압 전달함수이다. 절연형 DC/DC 컨버터는 입력에 연결된 AC/DC 컨버터의 전압을 변압비로 나누어 전압 제어기 지령으로 사용하여 출력 전압을 제어한다. AC/DC 컨버터와 달리, 전체 모듈이 그림8과 같은 제어기를 동시에 사용한다. 이를 통해 반도체 변압기 각 모듈의 DC링크 전압과 출력 전력 밸런싱이 가능하다.

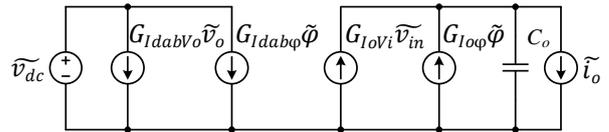


그림7 절연형 DC/DC 컨버터 소신호 모델
Fig.7 Small signal model of isolated DC/DC converter

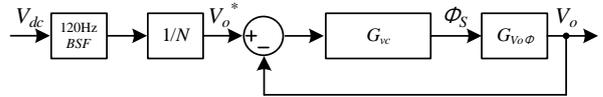


그림8 절연형 DC/DC 컨버터 제어 블록도
Fig.8 Control block diagram of isolated DC/DC converter

3. 모의 실험

본 제안한 제어기의 동작을 검증하기 위해 모의 실험을 진행하였으며, 모의 실험에 사용한 시스템의 제정수는 표 1과 같다. M과 N은 순서대로 반도체변압기를 구성하는 모듈의 개수와 DAB 컨버터의 변압기의 권선비와 같으며 이의 제정수는 그림 1과 같다. 반도체 변압기의 정격은 모듈 당 5kVA으로 전체 15kVA급으로 설계하였다. 모듈의 개수와 DAB 컨버터 내부 변압기의 권선비를 의미한다. 마스터 H브리지 전압, 전류제어의 대역폭은 각각 50Hz, 1300Hz 로 설계하였으며, DAB 컨버터의 전압 제어기 대역폭은 500Hz 로 설계하였다.

표 1 모의실험에 사용된 시스템 제정수

Table 1 Values of System parameters in simulaion

M	3	N	2
L_g	250 μ H	L_{lk}	220 μ H
C_{dc}	500 μ F	C_{out}	210 μ F
V_g	2828Vrms	V_o	750V

4. 결론

본 논문에서는 단상 반도체 변압기의 분산형 제어 구조와 그 설계에 대해 설명한다. 분산형 제어구조는 각 모듈에 제어 변수를 공유하기 위한 고속 통신 라인의 제거가 가능하며, 제조 단가 및 시스템에 구성에 있어 단순하다는 장점이 있다. 제안된 분산형 제어 구조는 각 모듈의 소신호 분석을 통해 설계하였으며, 모의실험을 통해 그 동작을 검증하였다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.
(No. 20210501010020)

이 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (20212020800020, 통합형 최적설계 플랫폼 기반 초고효율 전력변환시스템 개발)

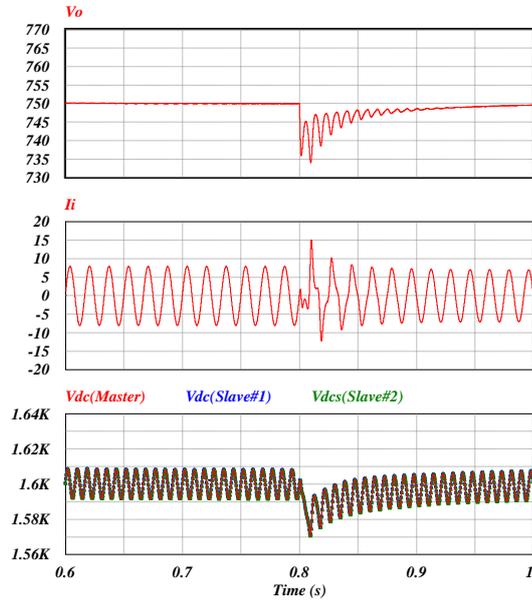


그림9 스텝 부하 인가 시 반도체 변압기 동작 파형(15kW → -15kW)
Fig.9 Dynamic waveforms of the system when the load steps between 15kW and -15kW

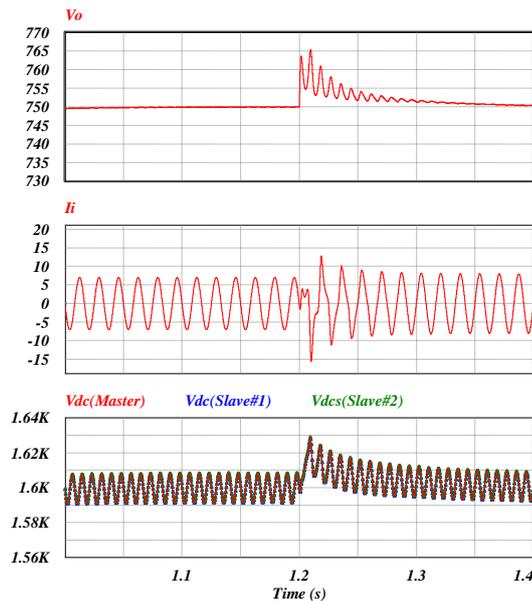


그림10 스텝 부하 인가 시 반도체 변압기 동작 파형(-15kW → 15kW)
Fig.10 Dynamic waveforms of the system when the load steps between -15kW and 15kW

그림 9와 그림10은 제안된 제어 구조를 적용한 반도체 변압기의 스텝 부하 인가 시 동작 파형을 나타낸다. 그림 9의 경우 15kW 부하에서 -15kW 부하로 변경시의 동작이며, 그림10은 반대로 -15kW 부하에서 15kW 부하로 동작시의 파형을 나타낸다. 두 동작 모두 정 전력부하를 이용하였다. 그림9는 0.8초일때, 그림10은 1.2초에서 스텝 부하 변경이 발생한다. 두 경우 모두, 일시적으로 과도상태가 발생하나 빠른 시간 내에 복구되며, 개별 모듈의 전압 밸런싱 또한 잘 진행됨을 확인할 수 있다.

참고 문헌

- [1] X. She, A. Q. Huang and R. Burgos, "Review of Solid-State Transformer Technologies and Their Application in Power Distribution Systems," in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 1, no. 3, pp. 186–198, Sept. 2013
- [2] S. Pugliese, M. Andresen, R. A. Mastromauro, G. Buticchi, S. Stasi and M. Liserre, "A New Voltage Balancing Technique for a Three-Stage Modular Smart Transformer Interfacing a DC Multibus," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 34, no. 3, pp. 2829–2840, March 2019
- [3] A. Rodríguez, A. Vázquez, D. G. Lamar, M. M. Hernando and J. Sebastián, "Different Purpose Design Strategies and Techniques to Improve the Performance of a Dual Active Bridge With Phase-Shift Control," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 2, pp. 790–804, Feb. 2015