

멀티레벨 컨버터 기반 배전용 능동형 하이브리드 반도체 변압기에 대한 연구

윤춘기, 조영훈
건국대학교 전력전자연구소

A Study on Multi-level Converter Based on Distribution Active Hybrid Solid State Transformer

Chun gi Yun, Younghoon Cho
Power electronics lab., Konkuk university

ABSTRACT

Active hybrid solid state transformer(AHSST) is newly emerging as a device to maintain the power quality of power distribution. AHSST has a simple structure in which a power electronics device is connected in series to a conventional distribution transformer. The connected power electronics device maintains the constant voltage regardless of the primary grid voltage fluctuation through the secondary voltage control to improve the power quality. It also has a simple structure compare to conventional solid state transformer system and can achieve the same performance with fractionally rated converter. This paper proposes an multi level converter based on AHSST system that has a simpler control method and wider voltage control range than the conventional AHSST. The proposed system is verified by simulations.

1. 서론

최근 전력망에 신재생 에너지원이 급격하게 늘어남에 따라 계통의 전력품질을 유지하는 것이 중요한 이슈로 대두되고 있다. 기존의 배전용 변압기는 높은 신뢰성과 경제성으로 널리 사용되고 있으나 전압/전류 고조파, 순간전압 상승/하강 등의 전력 품질 문제 발생시 대처가 불가능하며 배전거리에 따라 전압이 강하하여 일정한 전력 품질을 유지할 수 없다. 이에 따라 이러한 단점을 보완하고 능동적인 전력 제어 기능을 가진 반도체 변압기가 활발히 연구되고 있다. 일반적인 반도체 변압기의 경우 전압 보상 및 역률, 전력 제어가 모두 가능하지만 고압 배전단 전압에 대응하기 위하여 고압스위치를 이용한 다단 형태의 회로 구조가 필수적이며 제어가 복잡하고 신뢰성이 보장되지 않는다는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 기존의 배전단 변압기에 연결되어 전압 보상, 역률 및 전력 제어가 가능한 능동형 하이브리드 반도체 변압기(AHSST : Active Hybrid Solid State Transformer)가 새롭게 연구되고 있다. AHSST는 기존 반도체 변압기와 다르게 배전용 탭 변압기의 일부분에 전력변환회로를 구성함으로써 변압기를 그대로 이용할 수 있어 추가적으로 필요한 요소가 없다. 따라서 실용성이 높고 경제적이며 탭에 인가되는 전압만을 입력으로 하기 때문에 기존 반도체 변압기에 비해 낮은 정격전력으로도 같은

성능을 구현할 수 있다. 본 논문에서는 AHSST에 대한 기존 회로를 분석하고 새로운 구조의 멀티레벨 컨버터 기반 AHSST를 제안하였다. 멀티레벨 컨버터 회로를 적용하여 스위치 정격을 낮춰 설계의 자유도를 높이고 기존의 릴레이 방식의 회로에서 필수적인 기동 시퀀스를 없애 기존의 직관적인 제어 방식을 제안하였으며 회로는 모의실험을 통하여 검증하였다.^[1]

2. 하이브리드 반도체 변압기

FUT(Field Upgradeable Transformer), CNT(Controllable Network Transformer)라고도 불리는 AHSST는 배전용 탭 변압기의 탭에 전력변환장치가 연결되어 있는 구조를 가진다. 일반적인 배전용 탭 변압기는 1차 고압(MV:Medium Voltage)측에 탭 권선이 구성되어 있으며 탭 위치에 따라 1차측 권선을 조절함으로써 2차측 전압의 크기를 변경시킨다. 이를 위해서 배전단 계통의 상황에 따라 일일이 탭의 위치를 직접 변경해줘야 하며 전압 급변에 따른 즉각적인 반응이 어렵다. 이를 해결하기 위해 전력변환장치를 이용하여 탭 전압의 권선의 조절과 같은 역할을 수행함으로써 1차측 전압의 변동에 대해 2차측 전압을 유지시키는 것이 AHSST의 주 목적이다. AHSST는 회로 구조와 위치에 따라 분류할 수 있다. 위치에 따른 분류는 전력 변환장치가 1차측 탭 권선에 위치하는 방식과 2차 저압측에 위치하는 방식으로 나눌 수 있다. 2차측에 위치하는 경우 2차측 전력제어가 용이하고 시스템 구성에 있어 구현이 간단하나 1차측 전압변동에 대한 대처가 어렵다는 단점이 있다. 따라서 1차측에 위치하는 AHSST의 연구가 활발히 진행되고 있으며 그 회로구조에 따라 제어방식을 달리한다. 1차측에 전력변환장치가 구성되는 가장 대표적인 AHSST의 회로는 그림1(a)와 그림1(b)이다. 먼저, 그림1(a)의 양방향 스위치 S1과 S2는 서로 상보동작한다. S1이 턴 온 되면 변압기의 턴수 비는 1:(1+n)이 되어 2차측 전압이 감소한다. 반대로 S2가 턴 온 되면 턴수 비는 1:(1-n)이 되어 2차측 전압이 증가하는데 이를 이용하여 2차측 전압을 제어할 수 있다. 또한, 스위치에 인가되는 전압을 줄이고 fault에 대한 제어를 위하여 릴레이를 사용하여 제어하는 방식도 연구되고 있으며 그 회로는 그림1(b)와 같다. 2차측 전압이 낮을 경우 R1이 켜지며 회로는 부스트 컨버터와 같이 동작하게 된다. 반대의 경우 R2가 켜지며 AHSST는 벡 컨버터와 같이 동작하여 2차측 전압을 감소시킨다. 두 회로 모두 탭에 인가되는 전압을 입력으로 하여 그 평균값을 출력하게 되며 이 경우 계통과 동상의 전압을 간단하게 구현할 수 있다.^[1]

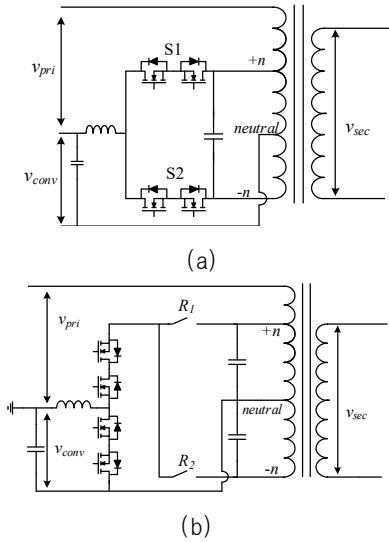


그림 1 HASST 기본 회로 구조
Fig. 1 HASST basic circuit structure

3. 2스테이지 하이브리드 반도체 변압기

3.1 멀티레벨 컨버터 기반 2스테이지 하이브리드 반도체 변압기 회로

하이브리드 반도체 변압기의 기본적인 모델링은 아래의 그림2와 같다. 변압기의 1차측은 계통과 전력변환회로의 출력이 직렬연결되어 있으며 2차측에는 부하가 연결되어 있다. 탭 변압기의 $+n$ 과 $-n$ 으로 이루어진 1차측 탭에는 턴 수 n 만큼 V_{PE} , V_{\neq} 의 전압이 인가되게 되며 전력변환회로는 이 전압을 입력으로 하여 전압을 출력해 배전단 계통에 직렬보상해준다. 그 결과 1차측 배전단 전압($V_{grid-\neq utral}$)은 보상해주는 전력변환회로의 전압에 따라 전압의 크기가 변화하며 변압기의 턴 수에 따라 변환되는 2차측 전압을 제어할 수 있게 된다. 통상적으로 AHSST는 탭의 전압을 직접 변환하는 1스테이지 AC/AC 컨버터 또는 2스테이지 AC/DC/AC 컨버터 구조가 연구되어왔다. AC/AC컨버터의 경우 간단한 PWM만으로도 출력 전압제어가 가능하지만 스위치에 인가되는 전압이 탭 전압보다 높아 수 천V 이상의 고전압 스위치 사용이 불가피하다. 또한, 입력전압의 범위 내에서만 출력전압 합성이 가능하기 때문에 유·무효 전력제어를 위해서는 컨버터 출력전압 위상제어를 위한 별도의 복잡한 제어가 필요하다는 단점이 있다. 2스테이지 회로의 경우 V_{PE} 과 V_{\neq} 의 전압을 각각 승압·강압 모드에 따라 릴레이를 이용하여 선택적으로 컨버터의 입력으로 사용하게 된다.

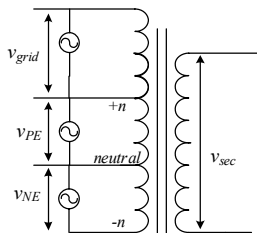


그림 2 HASST 모델링
Fig. 2 HASST modeling

2차측 전압 승압모드에서는 V_{PE} 를 입력으로 하여 전압을 합성해 1차측 변압기의 평균적인 턴 수를 낮춰 2차측 전압을 승압시킨다. 반대로 강압모드의 경우 V_{\neq} 를 입력으로 하여 변압기 1차측의 평균 턴 수를 높여 2차측 전압을 강압시킨다. 2스테이지 회로는 현재 하프브릿지 형태의 2레벨 회로만이 연구되었으며 탭 전압에 평균값을 그대로 계통에 보상해주기 때문에 제어가 간단한 장점이 있지만 승압·강압 모드에 따라 릴레이를 제어해야 하므로 전압변동에 따른 기동 시퀀스가 별도로 필요하다는 단점이 있다.

본 논문의 AHSST 시스템은 스위치에 인가되는 전압을 감소시켜 선택의 폭을 넓히고 컨버터 입출력 필터의 크기 감소를 위하여 3레벨 회로를 적용하였다. 또한, 입력전압을 V_{PE} , V_{\neq} 나누지 않고 탭 전압 V_{PN} 으로 하여 릴레이를 제거함으로써 모드에 따른 별도의 시퀀스 없이 2차측 전압제어가 가능하도록 하였으며 이에 따른 회로의 중성단 연결과 MI(Modulation Index)확보를 위해 풀브릿지 형태의 회로를 적용하였다. 본 시스템의 구조는 아래의 그림3과 같으며 AC/DC 정류기와, DC/AC 인버터의 2스테이지로 구성되어 있다. 정류기의 경우, 다이오드 브릿지를 사용해도 탭 전압만큼의 전압합성이 가능하지만 탭 전압 이상의 전압을 합성하여 전압제어의 범위를 넓히기 위해 3레벨 NPC 컨버터 회로를 적용하였다. 정류기는 탭 변압기의 탭 전압(V_{PN})을 입력으로 하며 직류링크 전압과 정류기의 입력전류를 제어한다. 인버터 역시 3레벨 NPC 컨버터 회로를 적용하였으며 2차측 전압을 제어하기 위한 보상 전압을 계통입력에 직렬로 보상해주기 위하여 2차측 전압을 전압제어 요소로 삼으며 계통의 입력전류가 되는 출력전류를 제어한다. 2차측 부하에 신재생에너지원이 연결되어 있을 경우 인버터 출력전압 크기, 위상을 제어하여 전력제어도 가능하다. 시스템은 대한민국의 배전 변압기를 기준으로 하기 때문에 13.2kV의 입력전압과 220V의 출력전압을 가진다. 또한, 탭의 턴 수에 따라 2차측 전압보상률이 정해지는데 변압기 1차측 턴 수의 5%로 하여 전압제어 범위를 정격의 $\pm 5\%$ 로 선정하였다. 시스템의 제정수는 다음의 표1과 같다.

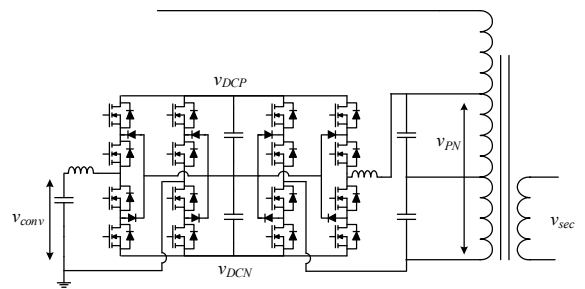


그림 3 제안하는 HASST 시스템
Fig. 3 Proposed HASST system

표 1 시스템 제정수
Table 1 system parameters

v_{in}	13.2kV	v_{out}	220V
V_{DC}	2200V	turn ratio	60:1(± 3)
f_{sw}	30kHz	P_{rated}	5kW
output filter	2mH, 4 μ F	v_{conv}	$\pm 660V$

3.2 하이브리드 반도체 변압기의 제어

정류기의 제어기는 내측 입력전류제어기와 외측 직류링크 전압제어기로 구성되어 있으며 제어기 구조는 아래의 그림4와 같다. 배전단 계통 전압이 급변할 경우 인버터의 전압보상에 대한 범위가 줄어들게 된다. 이를 방지하기 위하여 직류링크 전압제어기를 외측에 구성하였으며 5%의 입력전압 변동에 대하여 220V의 직류링크 전압을 유지한다. 내측 전류제어기는 PR제어기로 구성하였으며 THD를 확보하기 위하여 PFC(Power Factor Correction)제어를 수행한다.

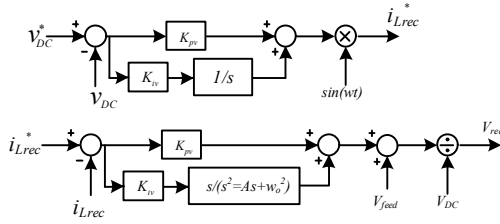


그림 4 정류기 제어기 블록도
Fig. 4 Rectifier controller block diagram

인버터의 제어기 역시 내측의 출력 전류제어기와 외측의 출력 전압제어기로 되어 있으며 전류제어기는 정류기와 동일한 PR제어기를 적용하였다. 인버터의 제어기 블록도는 아래의 그림5와 같다. 전압제어기의 경우 인버터 출력전압이 아닌 2차측 전압 실효값 오차를 입력으로 하는 PI제어기를 구성하였다. 변압기 내부 임피던스에 따른 오차가 매우 작을 경우 변압기 1,2차측 전압의 위상은 동상이므로 출력전압의 위상을 기준으로 전류제어기를 구성하였다.

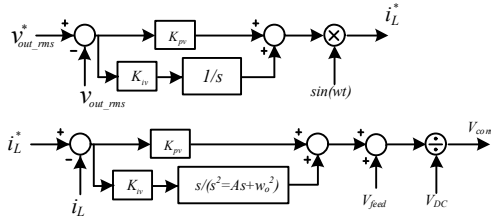


그림 5 인버터 제어기 블록도
Fig. 5 Inverter controller block diagram

4. 모의실험

본 시스템을 검증하기 위해 모의실험을 진행하였으며 모의 실험은 PSIM 프로그램을 사용하였다. 모의실험의 제정수는 표 1의 시스템 제정수와 같으며 전압제어 범위는 $\pm 5\%$ 로 선정하였다. 모의실험은 2차측 전압 제어에 대한 성능을 검증하기 위하여 2가지 경우에 대하여 진행하였다.

첫 번째로 2차측 출력전압 지령을 220V 기준 $\pm 5\%$ 로 변경하여 출력전압 제어범위를 검증하였다. 모의실험 결과는 그림6과 같다. 0~0.5초까지 출력전압 지령은 220V(1pu)로 유지하며 0.5초부터 5%인 209V(0.95pu)로, 1초 이후 출력전압 지령은 231V(1.05pu)로 변경하였다. 모의실험 결과 1차측 13.2kV에 대하여 220V기준 $\pm 5\%$ 의 범위에서 전압제어 성능을 확인하였다.

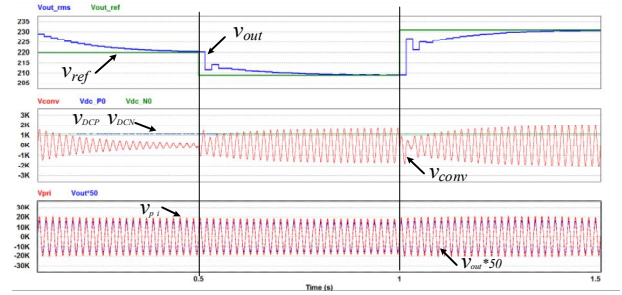


그림 6 출력전압지령 변동시 전압제어 모의실험 파형
Fig. 6 Simulation waveform of voltage control with output voltage reference variation.

두 번째로 1차측 입력전압 변동에 대한 2차측 출력전압 제어 특성에 대한 확인하였다. 0~0.5초까지 배전단 계통전압은 13.2kV(1pu)로 유지되며 0.5초부터 12.54kV(0.95pu)로 변경하여 전압 급강하 조건을, 1초 이후 13.86V(1.05pu)로 변경하여 전압 급상승 조건을 적용하였다. 모의실험 결과 전압 급변에 대해 2차측 전압 220V 기준 %의 전압변동을 이하로 제어됨을 검증하였으며 파형은 그림7과 같다.

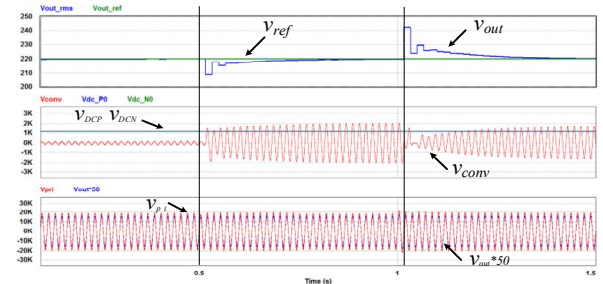


그림 7 입력전압 변동시 전압제어 모의실험 파형
Fig. 7 Simulation waveform of voltage control with input voltage variation.

5. 결론

본 논문에서는 멀티레벨 회로 기반의 HASST를 제안하였다. 멀티레벨 회로를 적용함으로써 기존 연구된 회로에 비해 높은 전압 제어범위를 가지며 릴레이의 사용을 없애 전압변동에 대한 빠른 제어 특성을 확인하였다. 시스템의 안정성은 모의실험을 통해 확인하였으며 향후 신재생에너지원이 연결될 경우 전력제어에 대한 알고리즘 분석 및 연구가 필요하다.

본 연구는 2017년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 에너지인력양성사업으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다.(No.20174030201660)

참고 문헌

[1] H. Chen, R. P. Kandula, A. Prasai, J. Schatz and D. Divan, "Flexible transformers for distribution grid control," 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2016, pp. 1-6.