

하이브리드 반도체 변압기의 1차측 정보를 이용한 2차측 간접 정전압 제어 기법

이태영¹, 윤춘기¹, 조영훈[†]

Secondary Indirect Constant Voltage Control Technique for Hybrid Solid State Transformer using Primary Side Information

Taeyeong Lee¹, Chun-Gi Yun¹, and Younghoon Cho[†]

Abstract

This study proposes an indirect constant voltage control algorithm for hybrid solid-state transformers (HSSTs) by using primary side information. Considering the structure of HSSTs, measuring voltage and current information on the primary side of a transformer is necessary to control the converter and inverter of the power converter. The secondary side output voltage is measured to apply the conventional secondary side constant voltage control algorithm, and thus, the digital control board requires the same rated insulation voltage as that of the transformer. To solve this problem, the secondary voltage of the transformer obtained from the tap voltage is used. Moreover, output voltage decreases as load increases because the proposed indirect constant voltage control scheme does not consider the cable impedance between the secondary output terminal and the load. This study also proposes a technique for compensating the secondary output voltage by using the primary current of the transformer and the resistance value of the cable. An experiment is conducted using a scale-down HSST prototype consisting of a 660 V/220 V tap transformer. The problem of the proposed indirect constant voltage control strategy and the improvement effect due to the application of the compensation method are compared using the derived experimental results.

Key words: Hybrid solid state transformer, Indirect constant voltage control scheme, Insulation voltage, Voltage drop compensation

1. 서 론

최근 신재생에너지, 마이크로그리드 등의 발달로 인해 배전 계통망이 복잡해지고 부하가 다양해짐에 따라 높은 계통 전압 및 전력 품질을 유지하기 위한 시스템이 연구되어왔다. 기존 배전 시스템에 사용되어 온 배전용 변압기는 수동적인 동작 특성을 가지고 있어 계통단 혹은 부하단 측에 불규칙한 전압, 전류 고조파 및 순간적인 전압 변동, 선로 임피던스에 따른 전압 강하 등의 문

제가 발생할 경우 반대측 단에 그 영향을 그대로 전달하기 때문에 높은 성능을 보장하기 어렵다.

이중 전압 강하를 보상하기 위해 배전망에서는 무부하시 탭 절환장치(No Load Tap Changer, NLTC)를 탑재한 탭 변압기를 사용하는 경우가 있으나 NLTC는 탭 권선 절환 시 변압기 운전을 완전 정지시킨 후 방전작업을 거쳐 동작시킬 수 있어 부하가 인가된 상태에서 실시간 변경이 불가능하다는 단점이 있다. 이러한 기존 변압기의 단점을 보완하고 전압 및 전류 고조파 보상, 역률제어 등을 위한 반도체 변압기(Solid State Transformer, SST)가 연구되었다. 반도체 변압기는 통상적으로 AC/DC 컨버터와 DC/DC 절연형 컨버터, DC/AC 인버터로 구성된 모듈을 직렬 혹은 병렬로 연결하여 고전압 배전계통에 연결하여 기존 변압기의 역할을 대체하는 시스템이다^{[1],[2]}. 그러나 모듈간 전압 불평형, 복잡한 시스템 및 제어구조 등의 단점을 가지고 있으며 시스템

Paper number: TKPE-2020-25-5-11

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

[†] Corresponding author: yhcho98@konkuk.ac.kr, Dept. of Electrical and Electronic Eng., Konkuk University
Tel: +82-2-450-3496 Fax: +82-2-450-3497

¹ Dept. of Electrical and Electronic Eng., Konkuk University
Manuscript received Apr. 14, 2020; revised May 8, 2020;
accepted May 12, 2020

고장 상황 발생 시 계통이 차단되기 때문에 즉각적인 대처가 어렵다^{[3],[4]}. 또한, 현재 상용화된 전력반도체 스위치는 최대 2kV 이하의 정격전압을 가지고 있는데 이 때문에 국내 13.2kV의 배전계통 전압에 대응하기 위해서는 최소 10모듈 이상이 연결된 직결(Cascaded) 형태의 멀티레벨 컨버터 회로가 강요되며 각 모듈간 제어 알고리즘이 추가적으로 필요하다는 단점이 있다. 최근 15kV의 전압정격을 가지는 WBG(Wide bandgap) 전력반도체 스위치 개발 사례가 학계에 발표되었으나 초기연구단계로 기술적 성숙도가 낮아 신뢰성을 보장하기 어렵다^[5].

앞서 언급된 기존 변압기와 반도체 변압기의 문제점을 보완하기 위해 기존 탭 변압기와 탭 절환장치, 전력변환장치를 융합한 새로운 형태의 하이브리드 반도체 변압기(Hybrid Solid State Transformer, HSST)가 최근 연구되고 있다.

하이브리드 반도체 변압기는 크게 탭 변압기와 전력변환장치로 구성되어 있다. 탭 변압기의 탭 출력 단자는 전력변환장치의 입력단에 연결되며 전력변환장치에 의해 변환된 출력전압은 계통에 직렬로 연결된다. 결과적으로, 변압기의 1차측 전압은 계통전압과 전력변환장치 출력전압의 합으로 나타낼 수 있으며 이 출력전압의 제어를 통해 2차측 전압을 제어할 수 있다^[6].

이때, 하이브리드 반도체 변압기의 전력변환장치는 탭 전압을 입력으로 하기 때문에 기존 반도체 변압기 대비 10% 이하의 전압 정격만으로도 반도체 변압기의 기능을 수행할 수 있다. 즉, 1.7kV급 이하의 정격전압을 갖는 스위칭 소자를 이용해 단일 모듈로도 시스템을 구성할 수 있다. 또한, 2차측 전압 제어 이외에 컨버터의 구조에 따라 보상범위를 넓힐 수 있으며 역률제어가 가능하며 양방향 전력제어도 가능하다^[7]. 그러나 기존 연구된 하이브리드 반도체 변압기는 2차측 전압제어를 위해 1, 2차측 전압을 모두 사용하기 때문에 고전압 배전계통에서 제어부 및 변압기에 절연 문제가 발생할 수 있다.

본 논문에서는 1차측 정보들만을 이용한 2차측 간접 전압 제어 기법을 제안한다. 제안하는 기법의 경우 변압기의 2차측 출력단이 제어되기 때문에 케이블 임피던스에 따른 최종 부하단의 전압 강하 문제가 있다. 이를 해결하기 위해 부하 전류에 따른 2차측 전압 강하 보상 기법 또한 제안한다. 제안하는 기법은 660V/220V 탭 변압기와 멀티레벨 컨버터로 구성된 하이브리드 반도체 변압기 시작품을 이용하여 그 효과를 검증하였다.

2. 하이브리드 반도체 변압기

그림 1은 하이브리드 반도체 변압기의 구성요소 및 시스템 구조를 보여준다. 하이브리드 반도체 변압기 시스템은 간단하게 탭 비와 권선비를 각각 $N_{tap}:1$, $N_{trans}:1$ 로 갖는 탭 변압기, 2단 구조의 전력 변환기 그리고 필터들로 구현할 수 있다. 여기서 2단 구조의 전력

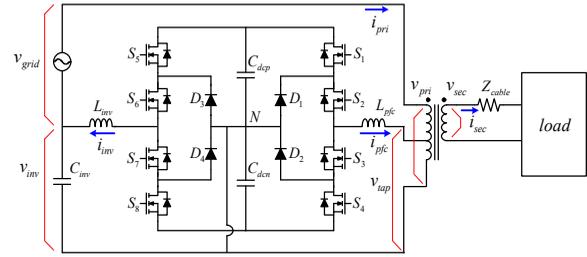


Fig. 1. Hybrid solid state transformer system.

변환기는 AC/DC 컨버터, 직류링크 그리고 DC/AC 인버터로 구성된다. 컨버터와 인버터는 3레벨 Neutral point clamped(NPC) 토폴로지로 구현되었다. 컨버터는 탭 비에 따라 출력되는 변압기의 탭 전압부에 연결된다. 그리고 컨버터는 역률 보상 기능으로 탭 전압과 인덕터 전류를 단위 역률로 제어가 가능하며 직류링크의 전압 제어를 수행한다. 인버터의 출력은 계통 전압과 직렬 연결된다. 따라서 탭 변압기의 1차측 전압은 식 (1)과 같이 계통과 인버터 출력 전압의 합으로 나타낼 수 있다.

$$v_{pri} = v_{grid} + v_{inv} \quad (1)$$

한편 탭 전압은 변압기 1차측 전압에 탭 비를 곱한 것으로 식 (2)와 같이 표현된다.

$$v_{tap} = \frac{1}{N_{tap}} v_{pri} = \frac{1}{N_{tap}} (v_{grid} + v_{inv}) \quad (2)$$

식 (1), (2)로부터 변압기 2차측 전압은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$v_{sec} = \frac{1}{N_{trans}} v_{pri} = \frac{1}{N_{trans}} (v_{grid} + v_{inv}) \quad (3)$$

여기서 N_{trans} 는 변압기의 권선비를 나타낸다. 식 (1)에서 표현되는 인버터 출력 전압은 직류링크의 전압을 이용하여 합성되며, 크기 및 위상을 제어하여 탭 변압기 2차측 전압 제어 또는 역률 제어가 가능하다.

3. 제안하는 2차측 정전압 제어 기법

기존 하이브리드 반도체 변압기의 2차측 전압 제어 알고리즘에서 필요한 변수는 인버터 출력 전압, 인버터 인덕터 전류 그리고 2차측 출력 전압이다. 그림 2는 기존의 2차측 정전압 제어기의 구조를 보여준다^[7]. 여기서 2차측 정전압 제어기는 2차측 전압 제어기, 인버터 전압 제어기, 인버터 인덕터 전류제어기로 3중 제어루프 구조인 것을 확인할 수 있다. 변압기 2차측 전압 제어기는 동기좌표계로 변환하여 크기에 해당하는 q축 성분만 제어를 수행한다. 인버터 전압 지령은 2차측 전압 제어기의 출력 성분에 탭 전압의 위상을 곱하여 얻어진다.

그림 2의 기존 정전압 제어 기법의 경우 1차측, 2차측 변수 모두 측정하기 때문에 시스템의 절연 문제를 야기

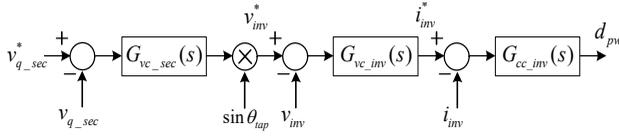


Fig. 2. Conventional secondary voltage controller.

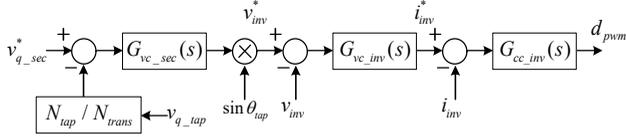


Fig. 3. Proposed indirect secondary voltage controller.

할 수 있다. 이를 해결하기 위하여 본 논문에서는 2차측 전압 정보를 받지 않고 1차측의 정보만을 이용하여 2차측의 전압을 간접적으로 제어하는 방법을 제안한다. 식 (1), (2), (3)을 보면 컨버터 제어에 사용되는 탭 전압을 이용하여 2차측 출력 전압을 구할 수 있다. 동기 좌표 변환된 탭 전압의 q축 정보를 이용하여 2차측 전압의 q축 정보를 식 (4)와 같이 얻을 수 있고, 이를 이용하여 제어기 구조를 변경한다면 전압 측정단의 절연 전압 문제를 완화시킬 수 있다.

$$v_{q_est_sec} = \frac{N_{tap}}{N_{trans}} v_{q_tap} \quad (4)$$

제안하는 2차측 전압 제어기 구조는 그림 3과 같이 나타낼 수 있으며, 기존 2차측 출력 전압의 측정값이 식 (4)와 같이 탭 전압으로 구한 2차측 전압으로 변수가 변경된 것을 확인할 수 있다. 각 제어기의 전달함수와 2차측 q축 전압 지령은 기존 정전압 제어 알고리즘과 동일하게 설계한다. 본 논문에서 제안하는 알고리즘은 요구되는 절연 사양이 낮아지는 장점이 있지만, 변압기 정전압 제어되는 2차측 출력 전압의 크기가 부하가 커짐에 따라 감소되는 문제점이 있다. 이는 탭 전압으로 2차측 전압을 제어하게 되면, 변압기 2차측 단자의 전압이 제어됨으로 부하와 연결되는 케이블 임피던스 Z_{cable} 이 고려되지 않는다. 따라서 식 (5)와 같이 부하에 따라 흐르는 전류, 케이블 임피던스의 곱에 해당하는 전압 강하 및 위상 지연이 발생하게 된다.

$$v_{drop} = i_{sec} Z_{cable} \quad (5)$$

$$v_{d_drop_est} = N_{trans} i_{d_pri} X_{cable} \quad (6)$$

$$v_{q_drop_est} = N_{trans} i_{q_pri} R_{cable} \quad (7)$$

전력 변환기 컨버터 전류 i_{pfc} 의 크기가 작아서 식 (5)의 2차측 전류는 1차측 전류만으로 증가가 가능하다. 이를 동기좌표 변환하면 식 (6), 식 (7)과 같이 표현되며 전압 강하에 해당하는 q축 정보와 위상 지연에 해당하는 d축 정보를 구할 수 있다. 그림 4는 본 논문에서 제안하는 2차측 간접 정전압 제어기 구조를 보여준다. 전압

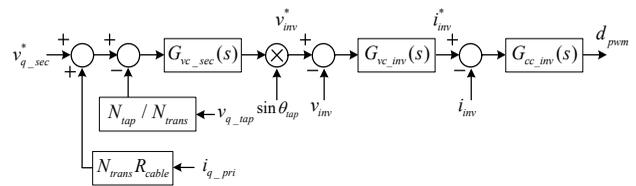


Fig. 4. Proposed secondary voltage controller with voltage.

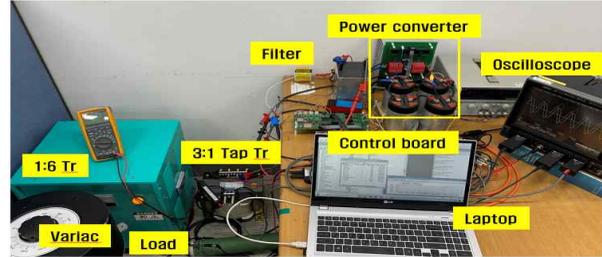


Fig. 5. Experimental setup.

TABLE I
PARAMETERS OF HYBRID SOLID STATE
TRANSFORMER SYSTEM

Parameter		Value
Tap transformer	Tap ratio ($N_{tap} : 1$)	11 : 1
	Turn ratio ($N_{trans} : 1$)	3 : 1
	Magnetizing inductance	3.08 (H)
	Primary leakage inductance	2.9 (mH)
	Secondary leakage inductance	377 (uH)
Filter inductance of converter (L_{pfc})		4 (mH)
Filter inductance of inverter (L_{inv})		2.2 (mH)
Filter capacitance of inverter (C_{inv})		52.5 (uF)
DC-link capacitance (C_{dc})		350 (uF)
Switching frequency		20 (kHz)
Switching device		C2M0040120D

강하에 대하여 q축 정보를 이용하여 보상하기 때문에 그림 3의 방법에 비하여 보다 정확한 정전압 제어가 가능하다. 2차측 정전압 제어기에 의해 고조파 보상이 이루어지기 때문에, 계통 전압의 THD가 나쁜 조건에서도 q축 정보를 이용한 전압 강하 보상은 유효하다.

4. 실험 결과

제안하는 간접 정전압 제어 알고리즘의 유효성을 검증하기 위하여 계통 전압 660V 시스템으로 전압 레벨을 낮춘 시제품으로 실험을 진행하였다. 그림 5는 본 논문의 하이브리드 반도체 변압기 실험을 위한 구성을 보여준다. 그림 5의 슬라이더스와 1:6 변압기는 실효값 660V를 갖는 계통전압을 모사하기 위한 장치이고, 3:1의 권선비를 갖는 탭 변압기, 전력 변환기와 필터로 하이브리드

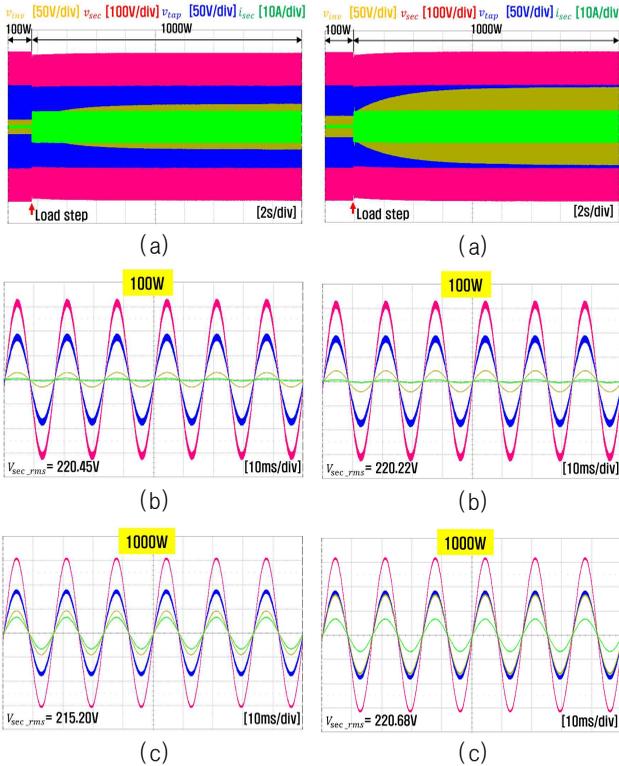


Fig. 6. Key waveforms of proposed secondary voltage controller.

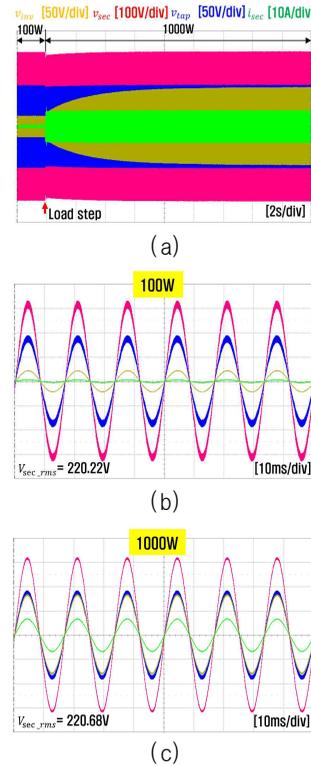


Fig. 7. Key waveforms of proposed secondary voltage controller with voltage drop compensation.

반도체 변압기 시제품을 구성하였다. 실험에 사용된 탭 변압기 및 필터 등의 사양은 표 1에 정리하였다.

그림 6은 제안하는 2차측 간접 정전압 제어 알고리즘 적용 시 인버터의 출력 전압, 2차측 출력 전압, 탭 전압, 2차측 출력 전류와 같은 주요 파형들을 보여준다. 그림 6(a)는 2차측 피크 전압을 311V로 정전압 제어할 때, 부하를 스텝으로 100W에서 1000W로 변경한 경우 정상상태로 도달하는 파형을 보여준다. 부하가 변경되기 전후의 100W, 1000W 조건 파형은 그림 6(b), 6(c)에서 확인할 수 있다. 부하 100W 조건에서 2차측 출력 전압의 실효값이 220V로 제어되는 것으로 정전압 제어가 제대로 수행됨을 알 수 있다. 부하가 1000W로 증가함에 따라 2차측 출력 전압의 실효값이 220.45V에서 215.20V로 약 2.38%의 감소가 발생하는 문제점이 확인된다.

그림 7은 제안하는 간접 정전압 제어 알고리즘의 2차측 피크 전압 지령 311V에 1차측 전류로 구한 전압 강하분을 보상하는 기법을 적용한 결과이다. 그림 7(a)는 보상 기법을 적용하여 2차측 출력 전압 제어를 수행 중에 부하를 스텝으로 100W에서 1000W로 변경한 경우의 파형을 보여준다. 그림 7(b)는 100W 부하 조건의 파형으로, 보상기법 유무에 상관없이 220V로 제어가 수행되는 것을 확인할 수 있다. 그림 7(c)의 1000W 부하 조건의 경우 보상되는 전압 지령에 대하여 출력되는 인버터의 전압이 그림 6(c)와 비교할 때 더욱 커진 것을 볼 수

있다. 보상되는 인버터 전압이 증가함에 따라 2차측 출력 전압이 220.68V로 전압 강하 없이 제어가 개선됨을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 1차측 정보를 이용한 하이브리드 반도체 변압기의 2차측 간접 정전압 제어 알고리즘을 제안한다. 부하에 따라 흐르는 전류와 2차측의 케이블 임피던스에 의한 전압 강하 때문에 제안하는 알고리즘의 경우 부하에 따라 2차측 출력 전압의 크기가 달라지는 문제점이 있다. 이를 해결하기 위해 1차측 전류와 가상 임피던스를 이용하여 전압 강하를 구하고 이를 2차측 전압 지령에 더하여 보상하는 기법을 제안한다. 1차측 정보만을 이용하여 간접적으로 2차측 정전압 제어 수행이 가능한 것을 확인하였다. 또한 제안하는 간접 제어 기법의 경우 1kW 부하조건에서 약 2%의 전압 강하가 발생하였고, 보상 기법의 적용으로 오차가 약 0.2%로 개선됨을 확인하였다.

본 연구는 한국전력공사의 2018년 선정 기초연구개발 과제 연구비에 의해 지원되었음. (과제번호: R18XA06-61)

References

- [1] X. She, X. Yu, F. Wang, and A. Q. Huang, "Design and demonstration of a 3.6-kV.120-V/10-kVA solid-state transformer for smart grid application," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 29, pp. 3982-3996, 2014.
- [2] X. She, A. Q. Huang, and R. Burgos, "Review of solid-state transformer technologies and their application in power distribution systems," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, Vol. 1, pp. 186-198, 2013.
- [3] J. Shi et al., "Research on voltage and power balance control for cascaded modular solid-state transformer," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 26, pp. 1154-1166, 2011.
- [4] J. Liu et al., "Voltage balance control based on dual active bridge DC/DC converters in a power electronic traction transformer," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 33, pp. 1696-1714, 2018.
- [5] A. Q. Huang et al., "15 kV SiC MOSFET: An enabling technology for medium voltage solid state transformers CPSS," *Trans. Power Electron. Appl.*, Vol. 2, pp. 118-130, 2017.
- [6] D. Das et al., "Power flow control in networks using controllable network transformers," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 25, pp. 1753-1760, 2010.
- [7] C. G. Yun and Y. Cho, "Active hybrid solid state transformer based on multi-level converter using SiC MOSFET," *Energies*, Vol. 12, No. 1, 2019.