

반도체 변압기용 고주파 변압기의 70k급 절연 설계

노은총, 손정우, 이승환
 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학과

70kV-class Insulation Design of Medium-Frequency Transformer for Solid-State Transformer

Eunchong Noh, Jeongwoo Son, Seung-Hwan Lee
 School of Electrical and Computer Engineering, University of Seoul

ABSTRACT

본 논문에서는 반도체 변압기 시스템을 위한 고주파 변압기의 내전압 70kV 실드형 절연 설계 방법을 제안한다. 또한 시뮬레이션을 통한 각 절연 구조의 절연 성능 비교 및 70kV급 고주파 변압기 설계의 시뮬레이션을 통한 검증을 제시한다.

1. 서론

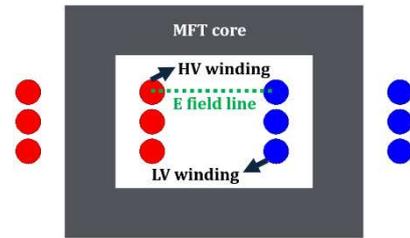
최근 전력 전자 기술의 발달로 기존 변압기를 대체하여 전력 밀도 향상과 제어를 통한 무효 전력 보상 및 고조파 감소 등이 가능한 반도체 변압기(solid-state transformer, SST)에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이러한 반도체 변압기 시스템에서는 저압 측과 고압 측의 절연을 위한 고주파 변압기의 내전압 성능이 요구되며 따라서 이를 충족하기 위한 절연 설계가 요구된다^{[1]-[2]}. 특히 철도 차량용이나 배전용 반도체 변압기 시스템의 경우 수십 kV 이상의 높은 내전압을 필요로 한다^[3]. 이러한 높은 내전압을 갖는 시스템에서의 절연 설계가 효율적으로 이루어지지 않을 경우 절연 구조로 인한 부피 증가로 인해 시스템의 전력 밀도가 크게 감소될 수 있다. 따라서 본 논문에서는 반도체 변압기 시스템의 전력밀도 향상을 위한 효율적인 고전압 절연 설계를 위해 실드형 절연 구조를 기반으로 반도체 변압기 용 고주파 변압기의 70kV급 절연 설계 방법을 제안한다.

2. 실드형 절연 구조 설계

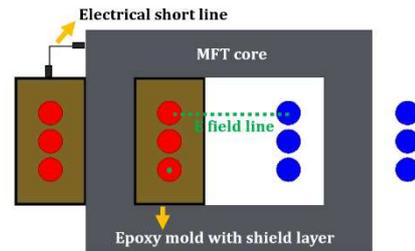
2.1 절연 구조별 절연 성능 비교

그림 1 (a), (b)는 각각 코어 타입 변압기 일반 구조와 실드형 절연 구조의 단면을 나타낸 것이다. 또한 그림 2 (a), (b), (c)는 절연 성능 비교를 위해 동일한 절연 거리를 가질 때 일반 구조, 몰드형 절연 구조, 실드형 절연 구조의 전기장 값을 그림 1의 E field line와 동일 선상에서 시뮬레이션 한 것이다.

고압 측과 저압 측의 절연을 위해서는 1) 고압 측과 저압 측 권선 절연 2) 고압 측과 변압기 코어 간의 절연을 만족해야 한다. 그림 1 (a)와 같은 절연 구조는 충분한 절연 거리를 확보한 후 공기를 통해서 절연이 이루어진다. 이러한 구조는 간단하지만 고전압 절연 시 공기의 낮은 절연 내력으로 인해 크기가 크게 증가하는 단점이 존재한다. 그림 2 (a)에서 공기만을 이용한 절연 구조는 절연 거리가 부족할 경우 공기 절연 내력을 초과하



(a)



(b)

그림 1 고주파 변압기 구조 단면 (a) 일반 구조 (b) 실드형 절연 구조

는 전기장이 유도되어 절연 파괴가 발생함을 알 수 있다.

이러한 단점을 해결하기 위해 더 높은 내전압이 요구되는 경우 절연 내력이 높은 절연유에 변압기를 담거나, 에폭시 몰드 층을 만드는 것이 일반적이다. 그러나 절연유를 이용하는 경우 무게와 유지보수 요소가 증가하여 반도체 변압기용 고주파 변압기의 경우 에폭시 몰드를 이용하는 것이 일반적이다^[4]. 그림 2 (b)는 그림 2 (a)의 시뮬레이션 모델에서 두께 10mm의 에폭시 몰드 층을 추가한 후 시뮬레이션 한 결과이며 에폭시의 높은 절연 내력으로 인해 에폭시 층에서는 절연파괴가 발생하지 않음을 알 수 있다. 그러나 에폭시 층을 벗어난 후 공기층에서 절연파괴가 발생하였다. 이를 해결하기 위해서는 1) 에폭시의 두께를 두껍게 하거나 2) 공기층의 거리를 증가시켜야 한다. 그러나 두 경우 모두 시스템의 부피가 증가하는 문제를 갖는다.

그림 1 (b)와 그림 2(c)는 각각 에폭시 몰드에 전도성 페인트를 도포하여 실드 층을 형성한 후 코어와 접지시킨 실드형 절연 구조와 이러한 절연 구조의 전기장 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 실드형 구조는 전계가 에폭시 내에서만 형성되기 때문에 그림 2 (b)의 몰드형 구조와 비교했을 때 에폭시 층에 더 높은 전기장 값을 갖게 된다. 그러나 에폭시의 절연 내력이 높아 에폭시 층에서 절연파괴가 발생하지 않고, 전계가 절연 내력이 낮은 공기층에 형성되지 않으므로 공기층으로 인한 절연 파괴 요소를

3. 결론

본 논문에서는 반도체 변압기용 고주파 변압기의 고전압 절연 성능 달성을 위한 실드형 구조 기반 절연 설계를 제안하고 이를 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

이 논문은 2024년도 지능형 사물 에너지 (iEoT) 반도체 시스템 융합 다빈치형 인력양성 센터의 “시스템 반도체 융합 전문 인력 육성 사업”으로 지원받아 수행된 연구 결과임(1711134724, 시스템 반도체 융합 전문 인력 육성 사업)이 논문은 차세대 반도체 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

- [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, no. 8, pp. 3982-3996, 2014, doi: 10.1109/TPEL.2013.2293471.
- [2] T. Zhao and D. Chen, “Active Power Backflow Control Strategy for Cascaded Photovoltaic Solid-State Transformer during Low-Voltage Ride through,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 69, no. 1, pp. 440-451, Jan. 2022, doi: 10.1109/TIE.2021.3051592.
- [3] D. D. A. Honorio, J. W. M. De Araujo, L. H. S. C. Barreto, and D. D. S. Oliveira, “Three-Leg Integrated Stage AC-DC Solid-State Transformer Feasible for MV Railway Applications,” *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 10, no. 4, pp. 3711-3720, Aug. 2022, doi: 10.1109/JESTPE.2021.3069129.
- [4] Z. Li, E. Hsieh, Q. Li, and F. C. Lee, “High-Frequency Transformer Design With Medium-Voltage Insulation for Resonant Converter in Solid-State Transformer,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 38, no. 8, pp. 9917-9932, 2023, doi: 10.1109/TPEL.2023.3279030.

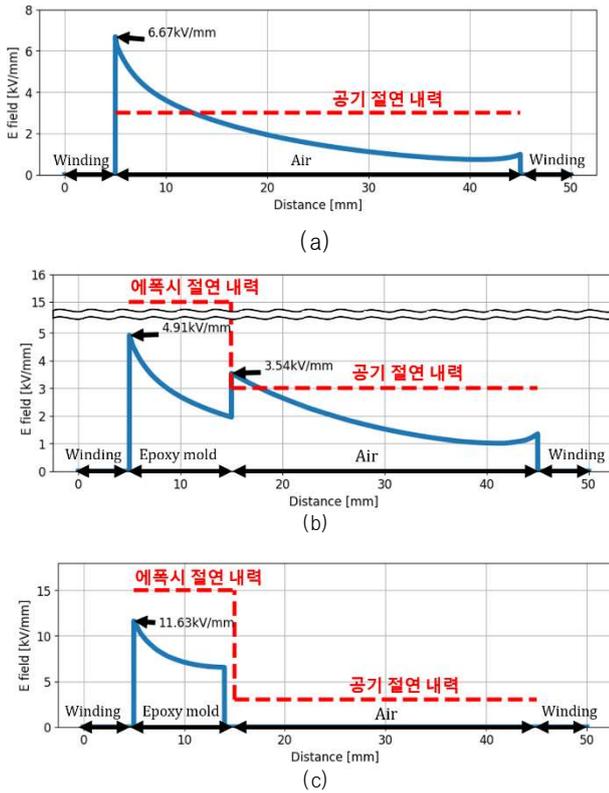


그림 2 고주파 변압기 전기장 시뮬레이션 결과 (a) 일반 구조 (b) 에폭시 몰드 절연 구조 (c) 실드형 절연 구조

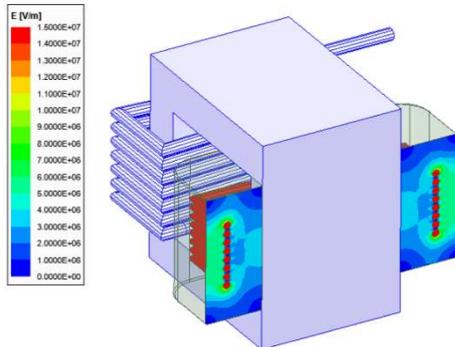


그림 3 실드형 절연 구조 고주파 변압기 70kV 절연 시뮬레이션 결과

차단할 수 있다. 결과적으로 실드형 절연 구조는 위 세 시뮬레이션 결과에서 동일한 절연 거리를 가질 때 유일하게 절연 성능을 만족하였다.

2.2 70kV 내전압 시뮬레이션

제시된 실드형 절연 구조를 이용하여 70kV급 내전압을 갖는 고주파 변압기를 설계하였으며 해당 변압기의 절연 성능을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 그림 3은 권선에 70kV를 인가한 고주파 변압기 모델과 해당 시뮬레이션의 전기장 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 에폭시의 절연 내력을 15kV/mm로 설정하였을 때, 몰드의 두께가 20mm일 경우 70kV 조건에서 10kV/mm 미만의 전기장 값을 가져 마진까지 고려한 70kV 내전압을 가짐을 확인하였다.