

단상 3레벨 PFC 컨버터의 모듈레이션 기법에 따른 효율비교 및 열해석

여시준, 백승훈, 조영훈, 최규하
건국대학교

Comparison of system efficiency and thermal analysis about single phase 3-level PFC converter with variation of switching modulation

Si Jun Yeo, Seunghoon Baek, Younghoon Cho, Gyuha Choe
Konkuk Univ.

ABSTRACT

본 논문은 단상 3레벨 PFC 컨버터에 적용하는 두 가지 모듈레이션 기법에 따른 시스템 효율 및 스위치 발열을 비교하고, 열해석 시뮬레이션을 통한 열 분포에 대한 결과를 기반으로 적절한 방열기법 모색을 위한 근거자료를 제시한다. 제안하는 모듈레이션 기법을 통해, 주 스위치인 SiC MOSFET의 도통손실을 저감하여 시스템 효율을 향상시키며, 스위치에 발생하는 열을 저감시킨다. 앤시스 열해석 시뮬레이션을 통해 이를 확인하고, 실험을 통해 검증한다. 정격부하(5kW)에 대해 약 27°C의 스위치 온도저감이 이루어졌으며, 전 부하(0.5kW ~ 5kW)에 걸쳐 약 1%의 효율이 향상되었음을 실험을 통해 확인하였다.

1. 서론

2레벨 컨버터에 비해 3레벨 컨버터는 효율 및 고조파 왜형률 등 많은 면에서 장점을 가지고 있어 산업분야에서 관심이 증대되고 있다. 이론적으로 3레벨 시스템의 반도체소자에 인가되는 전압의 크기는 2레벨 시스템의 절반이며, 이로 인해 낮은 전압 정격을 가지는 반도체소자를 사용할 수 있다. 이때 2레벨 컨버터와 비교하여 동일한 전류에 대해 낮은 스위칭 전압을 가지기 때문에 스위칭 손실을 줄일 수 있다^[1] 산업계와 연구기관에 따르면 3레벨 컨버터의 경우 98%에 가까운 효율^[2]과 높은 전력 밀도^[3]를 가진다고 보고되고 있다. 본 논문은 3레벨 PFC 컨버터에 두 가지 모듈레이션 기법을 적용함으로써, MOSFET의 바디 다이오드에 의해 발생하는 도통손실을 채널을 통한 도통손실로 바꾸어 시스템의 효율을 향상시켰다.

2. 3레벨 PFC 컨버터의 회로구조 및 동작모드

본 논문에서 소개하는 단상 3레벨 PFC 컨버터의 회로구조는 그림 1과 같다. 그림 1의 회로는 NPC 타입의 단방향 PFC 컨버터이며, 단방향 전력전달을 목적으로 D_{11} , D_{12} 를 다이오드로 구성하였다.

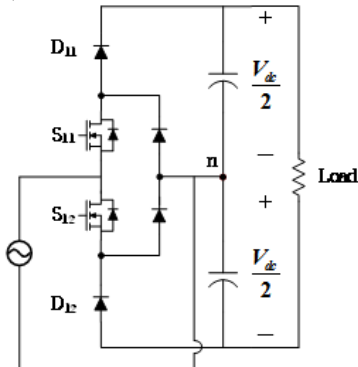


그림 1 단상 3레벨 PFC 컨버터 회로구조
Fig. 1 Single phase 3-level PFC converter topology

PFC 컨버터에 교류전압이 인가될 때, 중성단 스위치 S_{11} , S_{12} 의 On, Off 여부에 따라 전류도통 경로가 달라진다. 그림 2는 입력전압의 크기가 양인 경우($\sin\theta > 0$)일 때, 동작모드를 나타낸다.

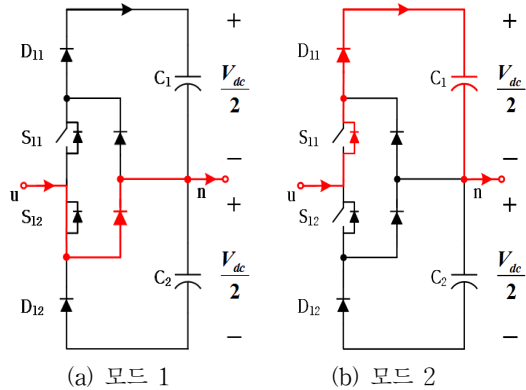


그림 2 양의 입력전압이 인가될 때의 3레벨 PFC 컨버터 동작모드
Fig. 2 operation mode of 3level PFC converter when positive input voltage applied

입력전압의 크기가 양인 경우($\sin\theta > 0$) 그림 2의 모드 1과 같이 S_{12} 가 ON이 되어 S_{12} 와 중성단 다이오드를 통해 인덕터를 충전시키며, S_{12} 가 Off됨에 따라 모드 2로 넘어간다. 모드 2에서 인덕터에 충전된 에너지가 S_{11} 과 D_{11} 을 통해 직류링크 상단 C_1 으로 전달되어 전압을 승압 시켜준다. 입력전압의 크기가 양인 구간에서 모드 1과 모드 2의 동작이 반복되며 직류링크 상단 C_1 의 전압제어가 이루어진다.

3. 모듈레이션 기법

입력 교류전압의 크기가 양일 때 기준으로 그림 2의 모드 2의 동작은 그림 3과 같이 MOSFET S_{11} 의 On, Off 여부에 따라 두 가지 전류도통 경로를 가진다. 그림 3의 (a)의 경우 S_{11} 이 Off 되어 있음에 따라 전류도통 경로가 MOSFET의 바디 다이오드를 통해 형성된다. (b)의 경우 S_{11} 을 On 시켜주에 따라 전류도통 경로가 MOSFET의 채널을 통해 형성된다. 즉, (a)의 경우 그림 2의 S_{11} 과 S_{12} 의 스위칭 신호가 항상 동일하게 동기 되는 경우이며, (b)의 경우 S_{11} 이 항상 On 상태를 유지하고 있는 경우이다. 예를 들어, 그림 3의 (b)와 같이 MOSFET 채널을 통한 전류 도통경로를 만들어 줄 경우 그림 2의 S_{12} 는 듀티 레퍼런스에 따라 스위칭하며, S_{11} 은 항상 On 상태를 유지한다.

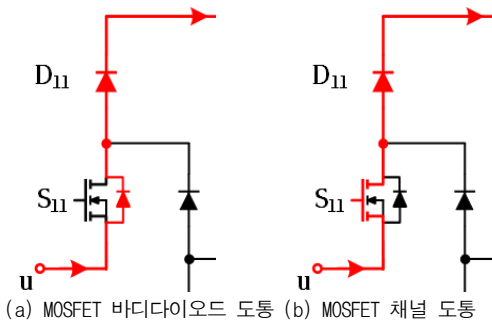


그림 3 모듈레이션 기법에 따른 도통 경로
Fig. 3 Conduction path by modulation scheme

3. 시뮬레이션 및 실험결과

모듈레이션 기법에 따른 시스템 효율과 MOSFET의 발열량을 비교하기 위해 0.5kW부하에서부터 5kW부하까지 0.5kW부하 간격으로 열해석 시뮬레이션과 실험을 진행하였다. 시뮬레이션의 경우, 실제 실험에 사용한 방열판과 스위치의 모델을 이용하였고, 팬을 통한 방열효과를 $2.5 \times 10^{-4} W/mm^2$ 으로 가정하였다. 앤시스 툴을 이용하여 시뮬레이션을 진행하였으며, 그림 4는 정격부하(5kW) 조건에서 모듈레이션 기법에 따른 열해석 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

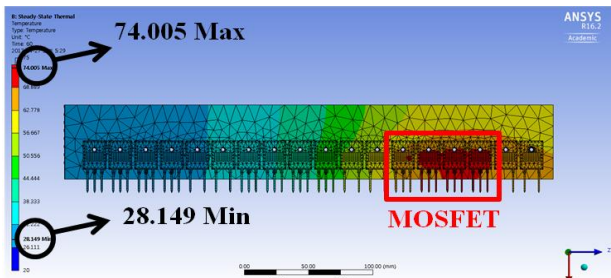


그림 4 앤시스 열해석 시뮬레이션 결과, 5.0kW 부하조건
Fig. 4 Result of ANSYS thermal simulation, 5.0kW load

시뮬레이션 결과 MOSFET의 최고온도는 실험 측정치보다 약 4°C 낮은 74.005°C로 나타났다. 실험에 사용한 모듈은 3레벨 PFC 컨버터와 3레벨 NPC 인버터가 하나의 방열판에 구성되어 있는 UPS모듈이며, 이 중 3레벨 PFC 컨버터만 구동하였다. 시뮬레이션의 열분포 결과에 근거하여, 발생하는 열의 대부분은 MOSFET의 바디 다이오드를 통해 발생하는 손실에 의한 열로 확인된다. 오른쪽 두 스위치의 경우 방열판의 길이가 짧아 열전도가 어렵고, 왼쪽 두 스위치와 비교해 상대적으로 방열이 원활히 이루어지지 않아 왼쪽 두 스위치에 비해 높은 온도를 가지는 것을 확인할 수 있다.

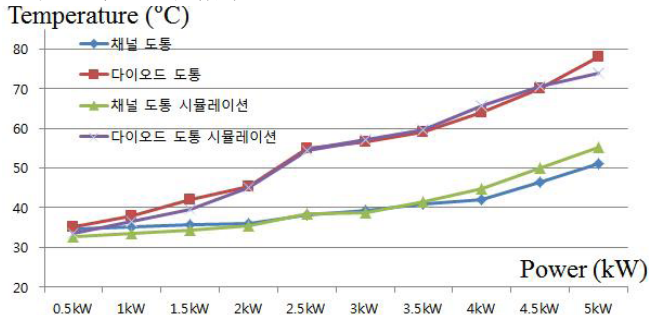


그림 5 모듈레이션 기법에 따른 MOSFET 온도의 시뮬레이션 결과 및 실험적 측정 결과
Fig. 5 Result of MOSFET temperature case by simulation and experimental measurement by modulation scheme

온도측정의 경우 Fluke 사의 Ti105를 이용하였으며, 상온 25°C의 동일한 조건하에 진행하였다. 두 경우 모두 방열을 위해 팬을 가동시켰으며, 동일한 팬을 동일한 위치에 사용하여 실험을 진행하였다. 그림 5는 부하에 따른 시뮬레이션 상의 스위치 온도 및 실험적 측정결과를 나타내며, 부하별 스위치의 최고 온도를 측정하여 기재하였다. 경부하 조건인 경우 모듈레이션 기법에 따른 스위치 온도차이는 5°C 내외로 큰 차이가 없는 반면, 부하가 증가함에 따라 두 도통 경로에 따른 온도차이가 증가하였으며, 5kW 부하에 대해 약 27°C의 온도 차이를 보였다.

Efficiency (%)

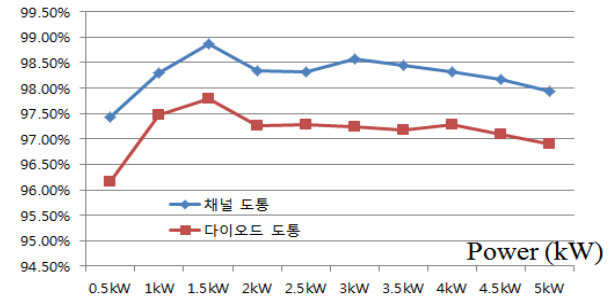


그림 6 모듈레이션 기법에 따른 효율측정 결과
Fig. 6 Result of efficiency measurement by modulation scheme

효율측정을 위해 Yokogawa사의 WT1800을 사용하였다. MOSFET 채널을 통해 전류도통 경로를 만들어 줄 경우 전 부하에 걸쳐 약 1%의 효율이 향상된 것을 확인할 수 있다. 모두 1.5kW 부하에서 최고효율이 측정되었으며, 이때 채널 도통 시 98.86%, 바디 다이오드 도통 시 97.79%의 효율이 측정되었다. 그림 6은 모듈레이션 기법에 따른 효율측정 결과를 나타낸다.

4. 결론

3레벨 PFC 컨버터에 대해 모듈레이션 기법을 달리 적용함에 따른 효율과 MOSFET 발열에 대한 차이를 실험을 통하여 확인하였다. MOSFET의 바디 다이오드 대신 채널을 통해 전류가 도통함에 따라 MOSFET의 도통손실을 크게 줄일 수 있었고, 이에 따라 전 부하(0.5kW ~ 5kW)에 걸쳐 약 1%의 효율이 향상되었다. 또한 5.0kW 정격부하에 대해 진행한 시뮬레이션 결과를 첨부하여 보다 적절한 방열기법을 모색할 수 있는 근거를 제시하였으며, 부하가 증가함에 따라 MOSFET의 발열 차이가 증가하는 것을 시뮬레이션과 실험을 통하여 확인하였다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No.20162220200010). 본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20174030201660)

참고 문헌

- [1] M. L. Heldwein, S. A. Mussa and I. Barbi, "Three Phase Multilevel PWM Rectifiers Based on Conventional Bidirectional Converters," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 25, no. 3, pp. 545-549, March 2010.
- [2] Guanghai Gong, M. L. Heldwein, U. Drofenik, J. Minibock, K. Mino and J. W. Kolar, "Comparative evaluation of three phase high power factor AC DC converter concepts for application in future More Electric Aircraft," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 52, no. 3, pp. 727-737, June 2005
- [3] P. Karutz, S. D. Round, M. L. Heldwein and J. W. Kolar, "Ultra Compact Three phase PWM Rectifier," APEC 07 Twenty Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Anaheim, CA, USA, 2007, pp. 816-822.