

Metal Powder를 이용한 PWM 컨버터 입력단 AC리액터 개발

이근호, 하경호, 김영균, 이지영, 홍정표, 이진기*
 창원대학교 전기공학과, *창원대학교 제어계측공학과

A Development of AC Reactor for PWM Converter using the Metal Powder

G.H. Lee, K.H. Ha, Y.K. Kim, J.Y. Lee, J.P. Hong, J.G. Lee
 Changwon National University

Abstract - In this paper, AC reactor for PWM converter using the metal powder is introduced. Metal powder AC reactor was developed to substitute conventional iron core typed AC reactor in the PWM converter application. The characteristics of the metal powder AC reactor are analyzed and tested. A new reactor has reduced switching noise and loss.

1. 서 론

최근 전기기기 분야에서 Metal Powder를 도입하려는 움직임이 크게 일고 있다. 절연피막을 가진 Metal Powder는 손실이 적으며 형상에 큰 제약을 받지 않아 상업적으로 그 이용가치가 매우 높다[1][2]. Metal Powder의 손실은 일반적인 적층판(lamination sheets)보다 적으며, 특히 고주파에서 우수한 특성을 가진다. 또한 Metal Powder의 제조기술은 적층과 관련된 제한 사항이나 높은 적층제조 비용을 줄일 수 있으므로, 전기기기 분야에서 그 응용이 기대되고 있다.

PWM 컨버터의 전류제어를 위하여 사용되는 입력단 AC 리액터는 스위칭 전압으로 인한 스위칭 리플 전류로 인하여 소음이 크게 발생하고 고조파 손실로 인한 발열이 심하다. 가전제품과 같이 조용한 환경에서 설치되는 제품의 경우 리액터 소음이 문제시되는 예가 종종 발생한다. 이러한 소음은 인덕턴스 값을 크게 설계하는 경우 전류 리플을 줄일 수 있고 소음도 저감할 수 있지만 부피가 매우 커질 뿐만 아니라 리액터에서의 전원주파수 전압강하가 많이 발생하는 문제점이 있다.

본 연구에서는 3상 교류전력을 직류전력으로 변환하는 PWM 입력단 AC 리액터의 소음과 발열을 저감하기 위하여 Metal Powder 리액터를 개발하여 보편적으로 사용되는 Cut-Core형과 그 특성을 비교 분석하였으며, 실제 3kW급 PWM 컨버터에 장착하여 실시한 실험결과를 통해 Metal Powder AC 리액터의 우수성을 소개하고자 한다.

2. 본 론

2.1 Metal Powder 리액터

A. Metal Powder Core

일반적으로 각종 에너지 변환기들은 철손을 줄이기 위해 규소강판을 적층 하여 사용하고 있으나 최근에는 Metal Powder를 전기기기에 적용하기 위한 연구가 진행되고 있다. Metal Powder는 금속 박편, 에폭시 수지, 절연 코팅된 금속 박편, 혼합물을 혼합하여 대형 압착기로 압착하여 제작한다. 입자 사이에 얇은 절연층은 높은 압력 후에도 보존되며 이 절연층은 중간 정도의 주파수에서 와전류에 의한 손실을 현저히 줄인다[1]. 또한 다양한 형상으로 분할 코어로 만들 수 있어 점적물을

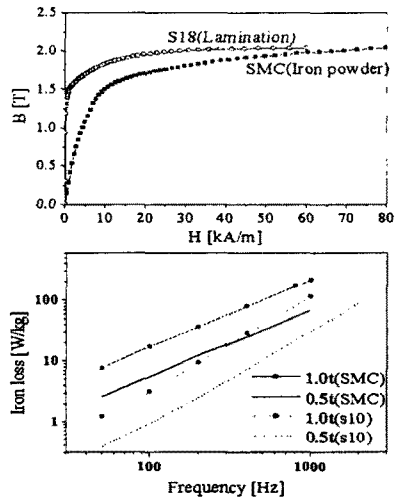


그림 1. 규소강판과 철분 철심의 자기적 특성 비교

향상시키고 동손을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 소형 경량화 및 조립이 쉬운 장점을 가지고 있다.

그림1의 하단은 S18의 규소 강판과 SMC(Soft Magnetic Composite) Metal Powder 철손을 비교한 것으로 주파수가 높을수록 SMC재질의 철손이 작음을 보인다. 그러나, 그림1의 상단에서와 같이 철심 재질에 비하여 투자율, 포화자속 밀도 등의 자기 특성이 낮은 단점을 가지고 있다.

전기기기 분야에서 적층은 와전류 손실을 줄이기 위해서 사용하는데 제작비용이 과다할 뿐 아니라 설계의 자유도를 매우 제한한다. 또한 제조가 복잡하고 비싸며 중대한 굽힘이 발생하기도 한다. Metal Powder의 경우 적층해서 제작하기 어려운 형상을 쉽게 만들 수 있으며 기계적인 강도 또한 매우 높고 상용주파수에서의 와전류 손실이 거의 없다[1]. 또한 Metal Powder의 경우 철심의 떨림이 없으므로 소음 진동 측면에서 큰 장점이 기대되며 부식이 되지 않는 장점을 가진다. 단점으로는 적층 철심에 비해 최대 비투자율이 500정도 되는 낮은 투자율을 가진다[1][2].

B. PWM 컨버터에서의 AC리액터

최근 전원 고조파에 대한 규제와 에너지 절감의 필요성이 크게 대두됨에 따라 AC전원을 DC로 변환하는 컨버터는 다이오드 정류형에서 PWM제어식으로 급속히 대체되고 있다. PWM 컨버터는 전원단 전류의 THD뿐만 아니라 회생운전이 가능하고 전원단 역률 제어 측면에서 매우 우수하다. 컨버터에서는 전원 측과 직류단 사이에 흐르는 전류를 제어하기 위하여 그림2와 같이 AC리액터가 반도체 소자와 직렬로 결합된다.

PWM converter를 설계할 때 DC link 전압, 입력 전압, 입력 주파수, 정격 power에 의해 AC리액터의 크기가 결정된다. 컨버터 측의 전류 제어 측면에서 보면 DC link의 전압은 높을수록 유리하지만 over-voltage fault시의 마진을 고려해야 하고, 입력단 전류에 포함된 리플은 DC link 전압이 높을수록 커진다. 입력 주파수가 높으면 같은 정격 전류에서도 리액터의 전압 강하가 크므로 컨버터의 전류 제어가 불리하고 입력 전압이 낮으면 정격 출력 파워를 내기 위한 기본파 전류가 커진다. 따라서 AC 리액터의 인덕턴스 값이 크면 전류 제어의 측면에서 불리하므로 상한이 있게 되고 기본파 전류에 대한 리플분 전류의 비율은 리액터의 인덕턴스 값이 클수록 작게 되므로 리액터 인덕턴스 값의 하한이 있게 된다.

일반적으로 PWM에 컨버터에 사용되는 리액터의 인덕턴스 값은 PWM의 정격 전류에서 입력전압의 강하가 약 10%발생하도록 하는 값을 산정한다. 이와 같이 산정할 경우 3kW급의 AC 리액터는 380V 3상 입력에서 약 7mH정도로 설계한다. 그러나 현실적으로는 AC리액터에서는 스위칭 소음이 크게 발생하는데 이러한 문제는 스위칭 주파수를 올려서 해결할 수 있으나 통상 인버터와 함께 사용되는 PWM 컨버터에서는 스위칭손실이 시스템 설계에 큰 영향을 미치므로 문제시된다.

2.2 Metal Powder 리액터 설계

그림3은 리액터에 흐르는 전류에 따른 리액터의 인덕턴스 값 특성을 나타낸 것이다. L1, L2, L3는 각각의 인덕턴스 특성으로서 L1형 리액터는 과부하 및 정격에서 허용오차를 최소화하는 특성이고 L2형은 일반적인 Iron-cored reactor 특성을 나타낸다. L3형은 경제적인 형식의 Swing Type 특성을 나타낸다. L1형 리액터는 정격부하 및 과부하에서의 인덕턴스 Tolerance를 크게 허용할 수 없는 경우이며, 저 자속설계 및 High B. Grade Core를 사용하고 공극 배치 및 분할에 유의하여야 한다. 이러한 특성은 가격을 상승시키는 요인이므로 가격 및 치수 등의 면에서 불리하다. 그러므로 낮은 인덕턴스의 리액터는 Air-Cored 형으로 설계하는 것이 유리하다. L2의 특성을 가지는 리액터는 정격 부하 및 과부하에서의 허용오차를 달리하는 경우로서 일반적인 Iron-Cored형 리액터 특성과는 다르다. 정격에서는 $\pm 10\%$, 과부하에서는 $-20\sim 30\%$ 허용하는 경우가 보편적이며 L1의 경우보다 경제적이거나 Over Load, Short-Circuit, Harmonics문제에 대하여 특히 유의할 필요가 있다. L3형 리액터의 특성은 Swing Type의 특성으로서 매우 경제적이다. 즉 정격 혹은 경부하에서의 큰 값의 인덕턴스를 가지며 과부하에서는 적은 인덕턴스를 가지도록 한 형태이다. L3특성의 리액터는 계통 및 회로 분석 기술이 충분히 따를 경우 제품의 경량화 및 저 가격화가 가능하다.

PWM 컨버터에 있어서 가장 적합한 리액터로는 L1형을 들 수 있다. 특히 가감속이 빈번히 발생하는 시스템에서는 가속시 정격의 1.5~3배에 달하는 전류가 흐르므로 전류의 변화에 대하여 인덕턴스 값의 변화가 적어야만 제어가 용이하고 스위칭 전류 리플 또한 줄일 수 있다. 또한 PWM 컨버터에 이용되는 리액터는 주파수 특성이 우수해야 한다. 스위칭 주파수의 전류리플이 존재하는데 스위칭 주파수 대역에서 인덕턴스 값이 현저히 저감되는데 공심형의 경우 고주파 특성이 우수하지만 같은 값의 저주파 L값을 가지기 위해서는 턴 수가 매우 많이 증가하므로 부피가 매우 증가하고 비용이 상승하는 문제가 있다.

Metal Powder는 규소 강판에 비하여 비투자율이 매우 낮지만 AC리액터의 응용에서는 불리한 점이 아니

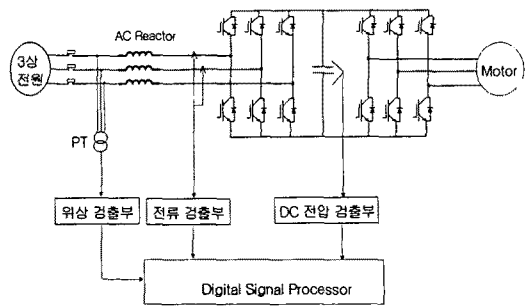


그림 2. PWM컨버터의 구성도

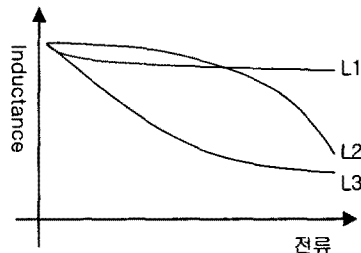


그림 3. 리액터의 전류에 따른 인덕턴스 특성

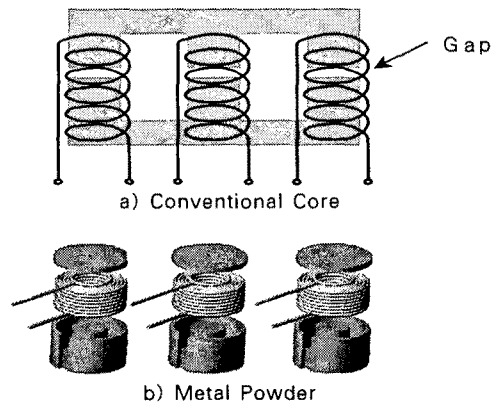


그림 4. 3상 AC 리액터의 구조

다. 왜냐하면 일반적인 3상 AC 리액터는 그림4와 같이 공극(Gap)을 가지며 철심의 와전류손을 줄이기 위하여 얇은 철심을 적층하여 제작한다. 공극은 전류에 대하여 철심이 포화되지 않도록 하기 위한 것인데 Metal Powder의 경우 입자 사이에 공극이 존재하므로 별도의 공극을 둘 필요가 없다. 입자 사이의 공극은 압착기에 의한 압착력에 따라 달라질 수 있으므로 압착력으로 비투자율을 조정하는 효과를 가질 수 있다.

Metal Powder의 경우 압착 정도에 따라서 자기적 공극이 달라지므로 공극은 없고 비투자율을 철과 코팅재에 의한 재질로 변경하여 생각할 수 있다. 실제 재료의 비투자율을 알기 어려우므로 초기 샘플을 제작하여 실험치로부터 Metal Powder의 비투자율을 산정하고 이 비투자율을 리액터 설계에 사용하였다. 실험을 통해 구해진 Metal Powder의 비투자율은 약 32정도로 계산되었다. 본 연구개발에서 제작된 Metal Powder Core의 치수는 직경이 약 66mm이고 높이는 39mm이다. 그림 5는 설계된 리액터에 정격전류가 흐를 때 자속 밀도 분포를 FEM(Finite Element Method)을 이용하여 해석한 결과이다.

3. 실험결과

A. Metal Powder리액터의 주파수 특성

그림 6은 Metal Powder를 이용하여 제작된 AC 리액터의 특성을 HP4194 Impedance Analyzer로 분석한 결과이다. Metal Powder의 경우 적층 Core에 비하여 매우 우수한 주파수 특성을 보임을 알 수 있다. 일반적인 리액터의 경우 주파수가 증가함에 따라 인덕턴스 값이 현저히 감소함을 보이지만 Metal Powder 리액터의 경우 주파수의 증가에 따라서 거의 일정한 인덕턴스 값을 유지한다. 이와 같은 임피던스 특성은 PWM 컨버터에서 스위칭 주파수 전류 리플을 현저히 줄일 수 있어 스위칭 손실뿐만 아니라 소음도 저감될 수 있다.

정격 7mH로 설계된 적층 Core의 인덕턴스 값은 저주파수에서는 그 값을 가지지만 스위칭 주파수 근처인 10kHz에서는 2.9mH의 인덕턴스를 가진다. 그러나 Metal Powder 리액터의 경우 7mH 정도 값이 유지되므로 그 우수성을 볼 수 있다. 고주파수에서의 높은 인덕턴스 값은 스위칭으로 인해 발생하는 낮은 주파수 대역의 EMI 저감에도 효과가 있을 것으로 본다.

B. 3-phase AC Reactor의 소음 특성

설계 제작된 리액터는 입력전압 380V, 60Hz 3상을 입력하여 직류전압 700Vdc를 제어하는 정격 6Arms 시스템에 탑재하여 실험하였다. 그림7은 전류에 따른 소음을 측정된 것인데 A 곡선은 Iron-Core형의 전체소음의 크기를 나타내며 B곡선은 동일 조건에서 스위칭 주파수(8kHz) 소음의 크기를 나타낸다. 곡선 C는 Metal Powder리액터의 전체 소음이며 D는 스위칭 소음을 나타낸다. Metal Powder 리액터의 스위칭 주파수대역(8kHz) 소음이 정격전류에서 약 9dBA정도 낮고 전체 소음은 약 6dBA정도 낮은 특성을 나타내었다. 이것은 스위칭 주파수의 소음은 적층 코어 구조에서 자속의 변화는 적층 날장간에 흡인력과 반발력을 일으키기 때문에 일체형으로 만들어진 Metal Powder 리액터보다 소음이 증가된 것으로 판단된다. 그림 8은 PWM 컨버터에 장착하여 AC 리액터에 흐르는 전류제어를 수행하였을 때 전류 파형을 나타낸다. Metal Powder AC 리액터의 스위칭 전류 리플이 작게 나타남을 알 수 있다. 스위칭주파수 8kHz의 고조파 전류 리플이 저감되어 AC 리액터의 온도상승이 억제되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 3상 교류 전력을 직류전력으로 변환하는 PWM입력단 AC 리액터의 소음과 발열을 저감하기 위하여 정격 6Arms급의 Metal Powder 리액터를 개발하여 그 우수성을 실험으로 확인하였다. 실험결과를 통해 Metal Powder AC 리액터는 종래의 구조상판 적층형보다 스위칭 소음이 약 10dBA정도 감소되었던 온도 상승 면에서 우수한 특성을 보였다. 향후 리액터와 같이 공극이 큰 전기기기에서는 Metal Powder의 이용이 기대된다.

(참 고 문 헌)

- [1] W.M. Arshad, "Application of SMC Iron Powder Materials in Electrical Machines", Master Thesis Paper, EX-EMD9804, Royal Institute of Technology(KTH), Stockholm, 1998
- [2] Jack A.G., "Experience with the use of soft magnetic composites in electrical machines", proceeding, ICEM'98, Istanbul, Turkey, September, pp1441-1448, 1998
- [3] 홍정표, 하경호, "자성재료를 이용한 전자에너지 변환기기의 설계 및 특성", 대한전기전자재료학회, 춘계학술대회 논문지, pp1-5, 2002

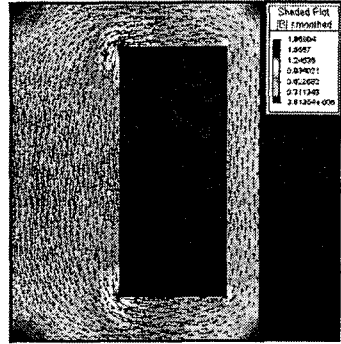
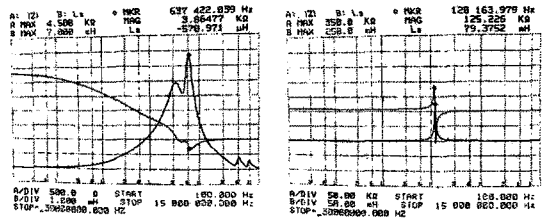


그림 5. Metal Powder 리액터의 자속밀도 분포 (정격전류)



a) Conventional type b) Metal Powder
그림 6. 리액터의 주파수 특성 비교(HP 4194 사용)

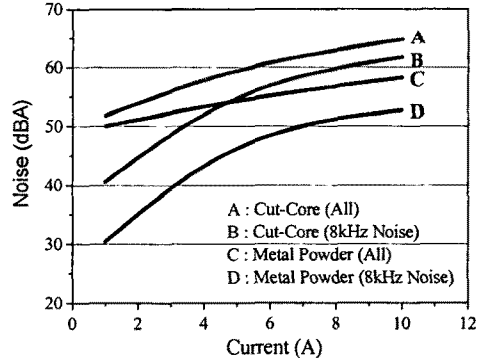
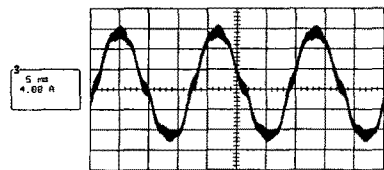
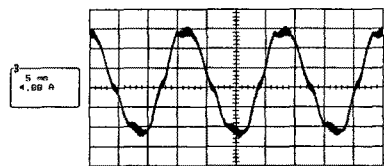


그림 7. Core와 전류에 따라 측정된 소음 비교



a) Cut-Core 리액터



b) Metal Powder 리액터

그림 8. PWM 컨버터에 적용한 리액터 상전류 (스위칭 주파수 : 8kHz)