

다중 코어를 이용한 고효율, 대전류용 변압기의 동작 특성

김현식, 이혜연, 김종령, 허정설, 이준희, 김기욱, 오영우*
(주)매트론 기술연구소, *경남대학교

Characteristics of Transformer Using Multi-Cores for High Current

H.S.Kim, H.Y.Lee, J.R.Kim, J.S.Huh, J.H.Lee, K.U.Kim, Y.W. Oh*
MATTRON Co., Ltd. R&D Center, * Kyung Nam Univ.

Abstract - 다중 코어를 이용한 대전류용 고효율 변압기 개발을 위해 고주파 손실이 작고, 전기 비저항이 큰 자성재료와 최적의 코어 형상 및 권선 방법에 대한 연구개발과 최종적으로 고효율 다중 코어를 이용한 변압기를 개발하고 전원장치에 적용하여 동작특성을 평가 하였다. 최소 손실 온도를 90 ℃ 이하로 감소시켜 100 kHz에서 250 kW/m³의 낮은 전력손실을 갖는 다중 코어를 이용하여 변압기를 제조하고, 제조된 변압기가 채용된 컨버터의 50 A 출력 전류에서 측정된 변압기의 발열특성은 30분 이후 약 58℃까지 증가하였으며, 30 ~ 80 A의 출력 전류에서 85% 이상의 고효율을 얻었다.

1. 서 론

공장 자동화용 산업기기 및 전자정보통신 기기 등에서 시스템에 안정된 전력을 공급하는 전원장치는 전력용 반도체의 발달과 함께 회로기술, 실장기술 등의 눈부신 발전으로 날이 소형경량, 고기능, 고신뢰성이 요구되고 있으며, 특히 마이크로 프로세서를 이용하는 시스템에서는 정밀한 제어가 가능한 저전압, 대전류의 출력 전력을 갖는 고효율 특성이 요구되어 지고 있다.

그러나 현재까지 이러한 전원장치에 적용되는 고주파용 저전압 대전류의 변압기에 대한 연구개발은 상당히 미비한 실정이며, 효율 증가를 위한 고밀도 전원장치용 변압기의 경우 전력의 증가에만 개발이 집중되고 대전류에 대한 고려는 간과되어 왔다. 특히, 현재 통신시장이 급격히 증대됨에 따라 백본 스위치나 페타비트급 라우터와 같이 광대역 무선통신을 위한 하드웨어의 구동을 위해서 전압은 낮으면서도 전류는 높아야 하며, 통신 하드웨어의 설계 시 소형·경량화에 따른 공간의 제약과 집적화로 인해 발열량이 매우 높아 기존의 변압기 설계 방식에 의한 하드웨어의 효율은 크게 떨어진다.

기존의 대부분 변압기는 1개의 코어에 많은 권선으로 구성되어 있으며, 이로 인해 높은 누설인덕턴스 그리고 낮은 고주파 응답 특성 때문에 에너지 손실이 크므로 변압기의 온도상승과 저효율이 큰 문제점으로 발생되고 있다. 이러한 변압기의 온도상승에 지배적인 영향을 미치는 것은 자심 재료의 손실 특성으로써, 일반적으로 전원장치의 고밀도화를 위해서 스위칭 주파수를 증가시키는데 스위칭 주파수가 증가할수록 자심 재료의 손실도 급격하게 증가한다. 따라서 고주파에서 자심 재료의 전력 손실을 감소시킬 수 있는 재료 개발이 필수적으로 이루어져야 한다.

본 연구에서는 다중 코어를 이용한 대전류, 고효율 변압기를 개발하기 위해 조성과 첨가제 그리고 대기압 상수를 조절하여 고주파 손실이 작고, 전기 비저항이 큰 자심재료를 제조하고 전자기적 특성을 분석하였으며, 제조된 자심재료를 이용하여 변압기의 권선방법과 자심재료의 형상을 변화시켜 변압기를 제작하고 최종적으로 전원장치를 제작하여 효율특성을 분석하였다.

2. 본 론

2.1 실험

고상법을 통한 Mn-Zn 페라이트의 합성에서 Fe₂O₃를 53 mol%로 고정하고, ZnO를 저손실 특성을 나타내는 조성인 8-12 mol% 범위로 변화시켰고, SiO₂와 CaO를 동시에 첨가하면 입계에서 저항층을 형성하여 와전류 손실이 저하되고 투자율이 증가한다는 기존의 보고에 의해 SiO₂와 CaO를 각각 100 ppm, 400 ppm 첨가하였다. 4℃/min의 승온속도로 1280℃에서 3시간동안 소결하였으며, Mn-Zn 페라이트의 동조성선(Isocomposition line)에 부합하는 산소분압을 유지시키고, 대기압 상수(Atmosphere constant, A)를 6.8-8.0의 범위로 변화시켰다. 그리고 승온구간, 소성온도 유지구간 및 냉각구간으로 나누어 각각의 구간부터 별도로 분위기 제어하여 특성변화를 관찰하였다.

제조된 자심재료를 이용하여 다중코어를 이용한 변압기의 구조를 설계하였고 동판을 이용하여 평면코일 패단을 설계, 제작 하였으며, 1,2차 권선 회로 설계 후 조립하여 다중 코어를 이용한 변압기를 제작하였고, 전원장치에 탑재하여 동작특성을 측정하였다.

2.2 특성평가

미세구조를 분석하기 위해 주사전자현미경을 이용하였고 B-H Analyzer (IWATSU/SY-8232)를 이용하여 자속 밀도, 전력손실 특성을 평가하였다. Impedance Analyzer (HP4294A)를 이용하여 인덕턴스와 품질계수(Quality Factor)를 측정하였고, Power Meter를 이용하여 전원장치의 효율 특성을 분석하였다.

2.3 결과 및 고찰

그림 1은 Mn-Zn 페라이트를 제조하기 위해 출발원료를 일정한 조성비로 혼합한 분말의 열 중량분석 결과를 나타낸 것으로서, (a) 영역(400 ℃ 이하)의 무게 감량은 시편 자체의 수분과 유기물의 소각에 의해 나타난 것이고, (b) 영역(400 ℃~700 ℃)에서 나타나는 미량의 무게 증가는 시편 제조에 사용된 MnO가 MnO₂로 산화되면서 나타나는 결과이며, (c) 영역(700 ℃~1000 ℃)에서의 급격한 무게 감소는 각 원료들이 스피넬 상(phase)을 형성하면서 발생하는 산소 가스(MnO₂ + Fe₂O₃ → MnFe₂O₃ + O₂ ↑, 2MnO + 2Fe₂O₃ → 2MnFe₂O₃ + O₂ ↑) 때문인 것으로 판단된다. 그리고 (d) 영역에서는 스피넬 상의 분해와 산화반응(2MnO + 2Fe₂O₃ → 2MnFe₂O₃ + O₂')으로 인해 미량의 무게 증가를 보이며, 이 현상은 (e) 영역의 냉각구간에서 급격하게 발생되는데, 자심 재료가 우수한 전자기적 특성을 나타내기 위해서는 각 구간에서 산소 분압과 대기압 상수를 제어해야만 할 것으로 생각된다.

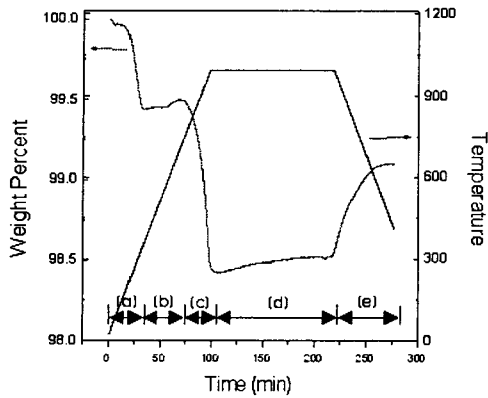


그림 1. Mn-Zn 페라이트의 열분석(TG) 결과

그림 2는 조성변화에 따른 전력손실 변화를 나타낸 것이다. ZnO의 몰 분율이 증가할수록 전력손실은 감소하는 경향을 나타냈으며, ZnO가 12 mol%에서는 다시 증가하였는데, 이것은 ZnO가 증가할수록 소결 중 발생하는 Zn loss 현상이 증가하고 결합의 발생 확률도 증가하게 되므로 전력손실은 증가할 수 있지만, Zn loss에 의한 전력손실의 증가폭보다 혼합 스피넬의 형성을 통한 투자율의 증가로 인한 상대적인 전력손실의 감소폭이 더 크게 되어 ZnO가 증가할수록 전력손실은 감소하였다. ZnO가 12 mol%에서는 Zn loss에 의한 손실 증가가 우세하여 전력손실은 다시 증가하게 된 것이다.

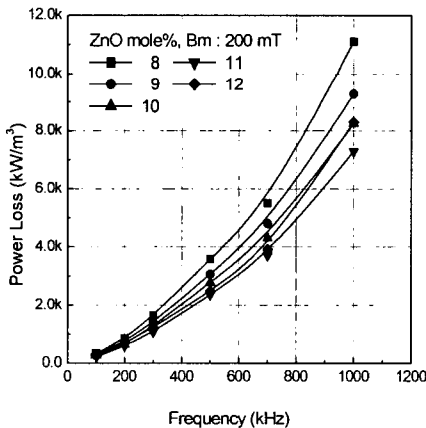


그림 2. 조성에 따른 전력손실 변화

그림 3은 $Fe_2O_3 : MnO : ZnO = 53 : 36 : 11$ mol%의 조성에서 SiO_2 와 CaO 를 각각 100 ppm, 400 ppm 첨가한 Mn-Zn 페라이트의 소결 과정 중 산소 분압을 제어하기 시작하는 위치에 따른 전력손실을 나타낸 것으로서, 그림 2의 첨가제가 없는 경우 보다 주파수에 대한 전력손실의 기울기가 전체적으로 감소한 것을 알 수 있다. 이것은 SiO_2 와 CaO 가 저온에서 공융점을 형성하여 소결을 촉진시키고 입계에 편석되어 저항층을 형성함으로써 와전류 손실을 감소시켰기 때문으로 판단된다.

또한 주파수가 증가함에 따라 냉각구간부터 산소 분압을 제어한 것 보다 승온 과정에서부터 산소 분압을 제어한 것이 전력손실의 증가폭이 감소하였는데, 이것은 승온 과정에서부터 산소 분압을 제어한 것 보다 그 이후에서부터 산소 분압을 제어할 경우 산소 분압의 불균형이 나타나날 확률이 높고, 산소 분압이 불균형을 이룰 경우 Zn-loss 현상이 증가하고 Fe^{2+} 이온 농도가 감소하거나

Fe^{2+} 와 Fe^{3+} 이온간의 호핑(hopping)현상을 증가시켜 전기 전도도의 증가, 즉 저항을 감소시킴으로서 와전류 손실이 증가되어 고주파 대역에서의 전력손실은 보다 큰 폭으로 증가하기 때문으로 판단된다.

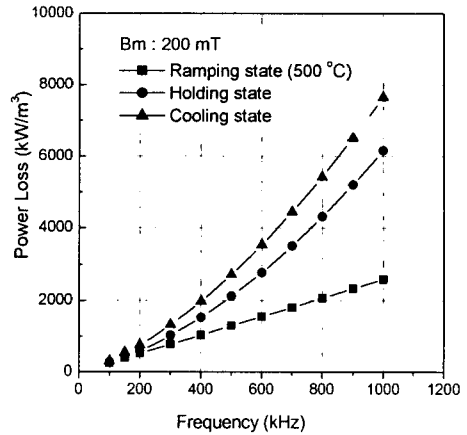


그림 3. 분위기 제어방법에 따른 전력손실

그림 4는 대기압 상수에 따른 최소손실을 나타내는 온도의 변화를 나타낸 것이다. 대기압 상수가 증가할수록 전력손실의 최소온도가 증가하고 있는데, 이것은 산소분압의 증가에 따른 Ferrous ion의 감소현상을 나타내는 증거라고 볼 수 있다. 그리고 온도 증가에 따라 이방성 상수가 0에 접근하게 되고 최소 손실온도를 지나면 이방성 상수는 다시 증가하여 손실이 증가하게 된다. 그리고 산소분압이 증가함에 따라 양이온의 공공에 의한 결합이 감소하여 결정립 크기는 증가하고, 결정립 크기가 증가할수록 최소손실온도는 고온으로 이동된다고 판단된다.

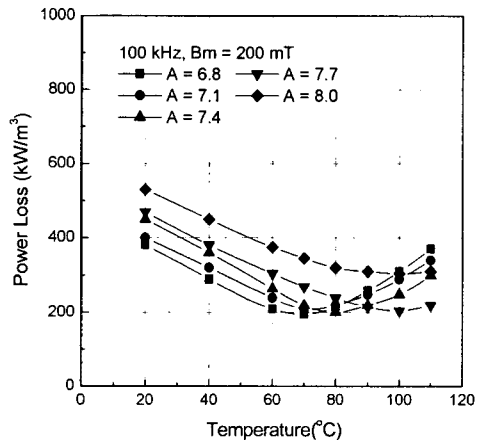


그림 4. 대기압 상수에 따른 온도-손실 특성

그림 5는 1, 2차 권선된 변압기 모듈의 개략도를 나타낸 것으로 각각의 코어는 모듈 블록내에 실장되어 하나의 모듈을 형성하고 5개의 모듈들은 'brick' 형태로 1차 권선에 의해 연결되어져 있다. 2차 권선 수는 한 턴으로 고정되어 있으며, 코어들의 전체 네트웍은 하나의 트랜스포머와 같이 거동하여 기존의 트랜스포머에 비해 높은 열 분산 특성, 저단면(low profile)을 가지도록 설계하였다. 코일은 자심재료 권선창의 내부표면 전체를 코일이 감싸고 있는 형태로 1차 코일이 2차 코일에 둘러싸이는 형상으로 권선하였다. 그림 6에 조립 완료된 다중코어를 이용한 변압기 모듈을 나타냈다.

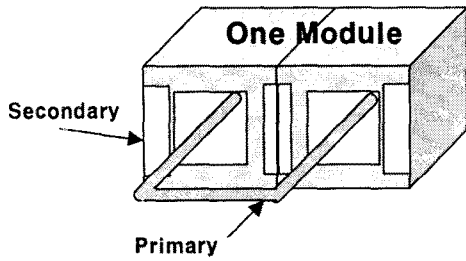


그림 5. 1, 2차 권선된 변압기 모듈의 개략도

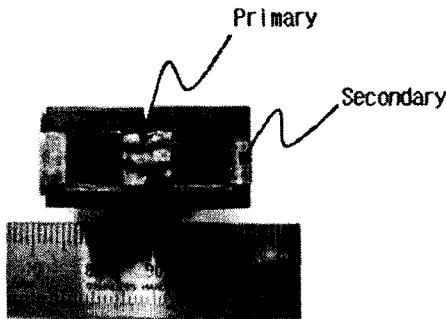


그림 6. 조립 완료된 다중 코어를 이용한 변압기 모듈

그림 7은 다섯 개의 모듈을 블록으로 형성시켜 자기 인덕턴스-누설인덕턴스-저항-성능지수를 측정된 것으로써, 100 kHz에서 자기 인덕턴스는 140 μH , 1.35 μH 의 누설인덕턴스, 1.18 Ω 의 저항, 70.5의 성능지수를 나타냈다. 자기 인덕턴스에 비해 누설인덕턴스가 매우 낮은 것을 확인할 수 있는데, 이는 다섯 개의 모듈을 블록으로 형성할 경우 1차, 2차 권선비가 10 : 1이 되지만 두 개의 터미널형 코어로 구성된 하나의 모듈은 1차, 2차 권선비가 2 : 1이 되기 때문이다. 즉, 각 모듈당 턴비는 2 : 1을 유지하면서 전체적으로 10 : 1의 효과를 가지게 된다. 다중 코어를 매트릭스로 설계하여 주권선의 턴 수를 줄여서 제작하기 때문에 턴 수의 제곱에 비례하는 누설 인덕턴스가 기존의 일반적인 변압기에 비해 매우 낮은 특성을 갖는다.

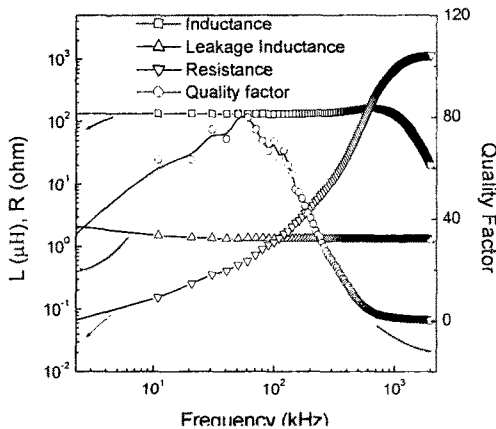


그림 7. Five module 블록의 주파수에 따른 자기인덕턴스-누설인덕턴스-저항-성능지수

그림 8은 출력 전류에 따른 변압기의 효율 변화를 나타낸 것이다. 30 ~ 80 A의 출력 전류하에서는 85% 이상의 고효율을 얻었고, 그 이상의 출력전류에서는 변압기 효율이 다소 감소하였다. 일반적으로 변압기의 효율은 출력 전류에 반비례하므로 기존의 컨버터에서는 단일 코어에 높은 전류가 가해져 낮은 효율을 가지지만 본 연구에서 개발된 변압기는 다중 페라이트 코어를 매트릭스로 설계 적용하여 각각의 코어에 출력전류를 분배하기 때문에 손실을 감소시켜 고효율을 달성할 수 있으며 2차 코일이 자심재료의 권선창 내부표면을 감싸고 있어 방열효과를 극대화함으로써 변압기에 hot spot을 형성하지 않아 컨버터의 신뢰성은 훨씬 향상된다.

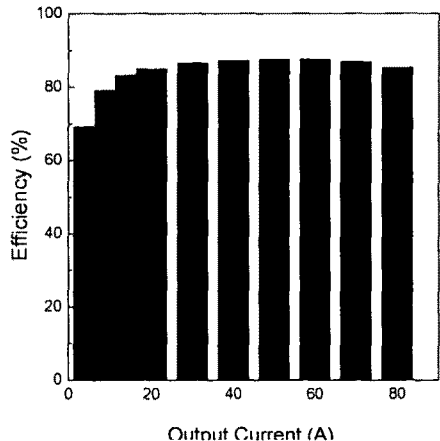


그림 8. 출력 전류에 따른 변압기 효율 변화

3. 결 론

다중 코어를 이용한 변압기에 적용하기 위해 고주파용 자심 재료를 제조하고 변압기와 전원장치에 적용하여 전자적 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. SiO_2 와 CaO 를 첨가하여 입계 저항층 형성함으로써 비저항 증가와 손실을 감소시켜 전자기적 특성을 극대화시킬 수 있었으며, 승온 과정에서부터 산소 분압을 제어하고 최적의 대기압 상수를 산출함으로써 가장 우수한 저손실 특성을 얻었다. 또한 최소 손실 온도를 90 $^{\circ}\text{C}$ 이하로 감소시켰으며 100 kHz에서 250 kW/m^3 의 낮은 전력손실을 나타냈다.

2. 1, 2차 코일의 권선수를 각각 10회, 1회, 그리고 코일 두께를 400, 300 μm 으로 하여 변압기 모듈을 제작하였고, 제작된 모듈 5개를 'brick' 형태로 1차 권선에 의해 연결하여 다중 코어를 이용한 변압기를 제작하였으며, 인덕턴스-누설인덕턴스-저항-성능지수는 100 kHz에서 자기 인덕턴스 140 μH , 1.35 μH 의 누설인덕턴스, 1.18 Ω 의 저항, 70.5의 성능지수를 나타내었다.

3. 개발된 자심재료를 이용하여 입력전압 130 ~ 170 VDC, 출력전압 5 VDC, 전력용량 400 W, 스위칭 주파수 200 kHz인 half-Bridge형 컨버터를 설계 및 제작제조된 전원장치는 30 ~ 80 A의 출력 전류에서 85% 이상의 고효율을 얻었다.

[참 고 문 헌]

[1] 김현식, 김종명, 이해연, 오영우, "코일 형태에 따른 변압기의 특성", 한국전기전자재료학회 2004 춘계학술대회 논문집, p. 161, 2004.
 [2] Toshitaka Minamisawa, Toshiro Sato, Kiyohito Yamasawa, "A new multi-polar flat transformer and its application to a planar type DC/DC converter", IEEE, p.1548, 1998