

고투자를 자심재료의 대전류 및 고주파 대역에서의 신호전송 특성

김현식, 김종령, 김기욱, 이준희, 변우봉*, 박병석**, 이태영**
(주)매트론 기술연구소, * 한국전기연구원, ** 한전전력연구원

Signal Transmission Characteristics of High Permeability Magnetic Materials at the High Current and Frequency

H.S. Kim, J. R. Kim, K. U. Kim, J. H. Lee, W. B. Byon*, B. S. Park**, T. Y. Lee**
MATTRON Co., Ltd. R&D Center, * KERI, ** KEPRI

Abstract - 고주파 고투자율 자심재료를 이용하여 비접촉식 커플러를 제조하여 고주파대역의 신호전송 특성을 평가하였다. 고주파 임피던스 매칭을 통해 고주파 대역에서 비접촉식 커플러의 신호전송 특성을 향상시킬 수 있었고, air gap의 형성으로 포화전류가 300 A 이상이고 2-40 MHz의 주파수 범위에서 -3 ± 2 dB의 신호전송 특성을 나타내는 비접촉식 커플러를 제조할 수 있었다. 또한 1 : 1의 권선비가 1 : 2보다 주파수 안정성이 우수하였고, 1 : 2는 저주파용 커플러에서 우수한 특성을 보일 것으로 평가되었다.

2. 본 론

2.1 실험방법

본 연구에 사용된 자심재료의 원료는 Fe계 비정질 금속재료로서, 530°C에서 1시간 열처리하여 투자율이 약 70,000 정도이고, 내경과 외경이 각각 64mm, 94mm인 자심재료를 제조하였으며, 약 500°C에서 내부스트레스를 제거를 위한 어닐링 공정을 취하였다.

비접촉식 커플러의 고주파 특성향상을 방법의 일환으로 합침 및 물딩, 절단 등에 의한 특성변화와 상용되는 지중선의 외경을 근거로 하여 비접촉식 커플러용 도체 케이스를 설계 및 제조하였다. 그리고 비접촉식 커플러의 특성은 고주파 특성의 안정화가 무엇보다 중요하므로 전력선에 맞는 임피던스 매칭을 실시하여 특성변화를 관찰하였으며, 절단면 사이의 air gap에 따른 최대허용전류를 평가하여 고압망 비접촉식 커플러의 특성 조건에 맞는 최적의 조건을 산출하고자 하였다. 그리고 제조된 커플러 특성의 평가를 위해 비접촉식 커플러의 해외 선진업체인 독일의 EICHHOFF社 제품과 비교분석하였다.

자심재료 및 커플러의 특성평가는 열처리 온도에 따른 결정상 형성을 XRD를 이용하여 분석하였고, 미세구조 및 결정상 분석을 각각 SEM과 TEM을 이용하여 분석하였으며, 제조된 코어의 인덕턴스를 Impedance Analyzer (4294A)를 이용하여 1-100MHz까지 측정하였다. 그리고 각 단계별로 구성된 커플러의 신호 감쇄특성(S21)을 Network Analyzer를 이용하여 측정하였다.

2.2 결과 및 고찰

그림 1은 커플러 제조에서 신호전송 선로의 단면적 확보를 통한 고주파 특성의 향상과 커플러의 외부케이스로 동시에 사용할 수 있도록, 도체 케이스를 커플러의 출력선로로 제조했을 경우에 나타나는 신호전송특성을 나타낸 것이다. 그림에서 보이는 바와 같이 저주파 대역에서는 도체 케이스의 사용 유무에 관계없이 유사한 신호전송 특성을 나타내지만, 주파수가 증가함에 따라 도체 케이스를 사용한 샘플의 경우 고주파 특성이 급격히 향상된 것을 볼 수 있다. 여기서 저주파 특성이 도체 케이스의 사용 유무에 관계없이 유사한 특성을 나타내는 것은 위의 실험 결과에서 언급한 바와 같이 신호전송 특성은 인덕턴스 값에 비례하기 때문이고, 주파수 증가에 따라 신호전송 특성이 향상되는 것은 1차적으로 출력선로의 단면적의 증가에 따른 신호전송손실이 감소되었기 때문이고, 2차적으로는 전력선에서의 신호를 모뎀에 연결된 선로에 통신신호를 유도할 때, 도체 케이스가 내장된 자심재료의 모든 외부표면을 둘러싸고 있기 때문에 자기장의 궤적을 도체 내부에서 최대한 형성되도록 하여 자기손실을 최소화하고 신호전송을 위한 입·출력 선로의 결합도를 향상시킬 수 있기 때문이다.

1. 서 론

전력선 통신(Power Line Communication)은 전력선에 고주파 통신신호를 커플링 하는 방식으로 최근 이에 대한 연구가 광범위하게 진행되고 있다. 전력선 통신은 전력선에 흐르는 통신신호를 가우 내의 모뎀으로 최소 손실로 전송시켜야 하는데, 주상변압기를 통과한 음성 및 데이터는 수 MHz 이상에서부터 열적 손실에 따른 전송 신호의 감쇄가 발생하여 신호전송 특성이 현저히 감소하게 된다. 이와 같은 신호전송 문제는 커플러(Coupler)를 통해 해결하게 되는데, 커플러는 고압선에서의 통신을 위해 필요한 통신 신호만을 선별하여 커플링 해주는 역할을 하는 전력선 통신에서의 핵심부품으로 신호전송 특성을 향상시켜주는 역할을 한다. 이 커플러는 접촉식과 비접촉식으로 나누어볼 수 있는데, 접촉식의 경우 전력선에 직접적으로 연결되므로 신호전송특성은 우수하나 체결의 위험성, 작업의 어려움, 높은 단가 등으로 인해 응용의 한계를 드러내고 있는 반면, 자기유도방식을 이용하는 비접촉식은 전력선 외부에 쉽게 체결할 수 있고, 2-30 MHz의 주파수범위 내에서 -5 dB 이상의 신호감쇄 특성만으로 적용가능하다고 할 수 있다.

이 비접촉식 커플러의 신호감쇄 특성을 좌우하는 것은 자심재료와 고주파대역에서의 신호전송 기술라고 할 수 있는데, 자심재료의 경우 전력선에는 수백 A의 전류가 흐르기 때문에 높은 투자율과 높은 포화전류 특성을 나타내어야 하고, 고주파대역 신호전송 특성은 절연재 합침, 출력권선의 구조 등에 대한 기술이 확립되어야 한다. 하지만 고투자율의 금속자심재료의 경우 해외기술에 의존하는 경우가 많고, 커플러용 고주파 신호전송 기술에 대한 구체적인 연구가 이루어지지 않아 전력선 통신용 비접촉식 커플러의 개발을 위한 체계적인연구가 필요한 시점이다.

따라서 본 연구에서 고주파 고투자율 자심재료를 이용한 비접촉식 커플러의 제조공정을 확립하기 위해 출력권선의 구조, 임피던스 매칭, 권선비 등의 공정변수에 대한 연구를 통해 고주파 신호전송 특성을 평가하고, 22.9 kV 지중선 고압망용 비접촉식 커플러로의 응용 가능성을 관찰하고자 한다.

그림 2는 통신선로의 주파수 특성은 임피던스 변화에 민감하게 반응하므로, 그림 1에서 나타난 결과를 전기적으로 해석하고자 도체 케이스 출력단에 의한 임피던스 변화를 측정된 것이다. 그림 2 (a)의 도체 케이스 체결 전의 경우, 약 20 MHz에서 50Ω 임피던스가 형성되어 주파수 증가에 따라 직선적으로 증가하는 경향을 보였지만, 그림 2 (b)의 도체 케이스 체결 후의 경우, 약 30 MHz에서 50Ω 임피던스가 형성되었고 그 이상의 주파수에서도 큰 변화 없이 유지되고 있음을 볼 수 있다. 이것은 고주파 대역에서 도체 케이스에 의한 자체적인 커패시턴스가 생성되고, 이로 인해 자체적인 고주파 임피던스 매칭을 이루어 주파수 증가에 따른 특성 저하를 방지할 수 있었던 것으로 판단된다.

고주파 대역의 신호전송 특성은 그림 1과 그림 2와 같이 도체 케이스를 이용하여 향상시킬 수는 있지만, 그것은 전력선에 실려 있는 통신신호를 유도하여 모뎀으로 전송시키는 출력권선의 도체 형상과 단면적 증가에 의해 부분적으로 향상된 것이라고 할 수 있다. 특히 그림 2의 자체적으로 생성되는 인덕턴스와 커패시턴스를 통한 50Ω 임피던스 매칭은 내부에 내장되는 자심재료의 특성과 내부 몰딩재료 및 몰딩 상태에 따라 불균일한 특성을 나타낼 수 있으므로, 균일한 고주파 신호전송 특성을 발휘하기 위해서는 고주파대역에서의 임피던스 매칭이 요구된다. 그림 3은 고주파 대역에서의 임피던스 매칭회로의 적용에 따른 비접촉식 커플러의 신호전송 특성 변화를 나타낸 것으로서, 그림 1과 같이 도체 케이스에 의한 고주파 특성이 1차적으로 향상되었고, 35 ~ 45 MHz의 범위에서의 임피던스 매칭에 의해 고주파 특성이 더욱 향상되어 주파수 변화에 대해 균일한 신호전송 특성을 나타내었다.

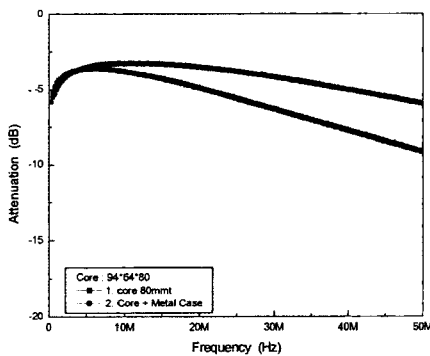


그림 1. 도체 케이스 출력단의 신호전송 효과

이때의 주파수 변화에 따른 임피던스 변화를 그림 4에 나타내었는데, 그림에 보이는 바와 같이 임피던스 매칭 주파수인 35 ~ 45 MHz에서 약 50Ω 으로 수렴하고 있는 것을 볼 수 있다. 이것을 그림 1과 그림 2의 결과와 비교해 볼 때, 도체 케이스에 의한 임피던스는 약 30 MHz에서 약 50Ω에 접근 한 후 다시 임피던스가 변하는 것을 볼 수 있으며, 신호전송 특성 또한 고주파 특성이 향상되기는 했지만 주파수 증가에 따라 점점 감소하는 특성을 나타내었다. 하지만 35 ~ 45 MHz에서 임피던스 매칭이 이루어진 경우에는 임피던스 매칭 포인트까지 아주 균일하고 우수한 특성을 나타내었다. 그리고 임피던스 매칭 포인트의 경우 그 이하의 주파수 대역의 특성은 매칭 포인트에서의 특성과 큰 오차를 없이 균일하게 유지되므로 임피던스 매칭은 최대 통신주파수 이후의 주파수에서 이루어지는 것이 커플러 특성발화에 유리할 것으로 판단된다.

22.9 kV의 고압망에는 약 300 A의 대전류가 흐르고 있어 비접촉식 커플러는 포화되지 않아야 한다. 자심재료의 포화전류는 절단면 사이에 air gap을 생성시켜 자심재료의 높은 자속밀도를 유지시키고 투자율을 감소시킴으로서 포화전류를 증가시킬 수 있다. 그림 5는 커플러 절단면 사이의 air gap과 전력선에 인가되는 전류량에 따른 신호전송 특성을 나타낸 것으로서, 측정 시 Width-band는 100Hz에 고정하고 측정된 것이다. 그림 5 (a)의 인가전류가 0 A일 때는 air gap의 증가에 따라 고주파대역의 신호전송 특성은 안정적이고, 균일하여 큰 변화가 나타나지 않았지만, 그림 5 (c)의 인가전류가 300 A일 때는 air gap이 300 μm까지는 주파수에 따라 신호전송특성이 아주 불안정한 경향을 나타내었고, 500 μm 이상의 air gap에서는 보다 안정적인 경향을 나타내었다.

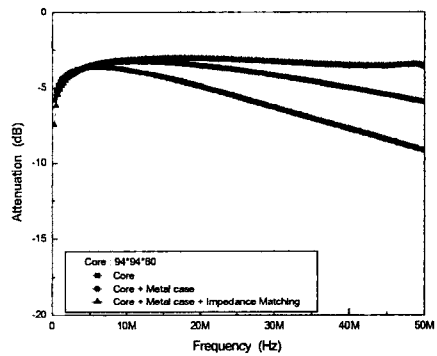


그림 3. 임피던스 매칭에 의한 신호전송특성 효과

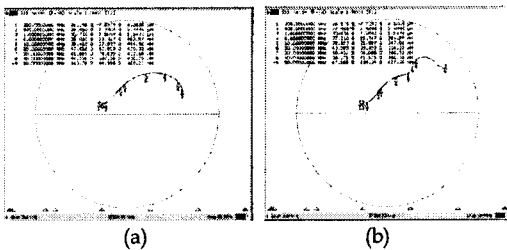


그림 2. 도체 케이스 출력단에 의한 임피던스 변화 (a) 도체 케이스 체결 전, (b) 도체 케이스 체결 후

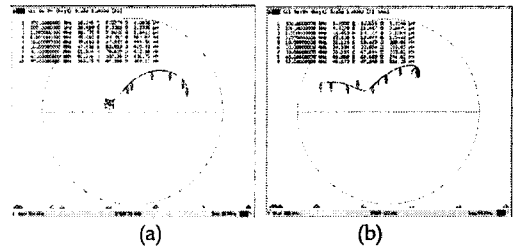


그림 4. 비접촉식 커플러의 고주파대역의 임피던스 변화 (a) 임피던스 매칭 전, (b) 임피던스 매칭 후

또한 저주파대역에서 나타나는 신호전송특성의 저하 현상도 현저히 감소한 것을 볼 수 있다. 따라서 국내의 지중선에 적용 가능한 비접촉식 커플러의 제조에서, 자심재료를 사용하여 500 μ m 이상의 air gap을 형성시키면 신호전송 특성과 포화전류를 만족하는 커플러를 제조할 수 있을 것으로 판단되었다.

그림 6은 커플러의 통신신호 입·출력선의 권선비에 따른 신호전송 특성을 나타낸 것이다. 권선비가 1 : 1인 경우와 비교해서 권선비가 1 : 2인 경우, 2 MHz 이하의 저주파 영역에서는 1 : 1의 경우보다 우수한 신호전송 특성을 나타내지만, 2 MHz 이상의 주파수 대역에서는 약 1 dB 정도 낮은 신호전송 능력을 나타내었다. 그러므로 권선비가 1 : 2인 경우는 저주파 대역에서 특성향상이 요구되는 경우에 적용될 수 있지만 2 ~ 30 MHz의 통신주파수를 가지는 전력선 통신의 경우에는 1 : 1의 권선비가 더 유리할 것으로 판단된다. 한편 향후 전력선 통신의 통신 주파수가 수백 kHz ~ 30 MHz로 확대될 경우에는 1 : 2의 권선비가 오히려 더 유리할 것으로 판단된다. 또한 2 : 2의 권선비는 모든 주파수 대역에서 월등히 우수한 신호전송 능력을 나타내고 있는데, 이것은 커플러의 신호전송 특성은 초기 인덕턴스 값에 비례하고, 인덕턴스는 권선비 증가율의 제곱에 비례하게 되므로 신호전송 특성은 급격히 증가하게 되는 것이다.

그림 7은 절단면의 air gap에 따른 커플러의 최대 허용전류를 나타낸 것으로, gap의 증가에 따라 최대전류는 거의 직선적으로 증가하는 경향을 보였으며, air gap이 약 700 μ m일 때 최대허용 전류는 약 400 A로 나타났다.

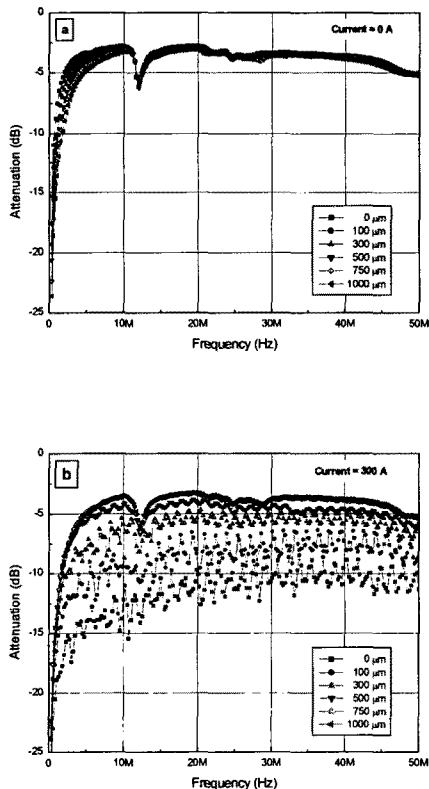


그림 5. Air gap과 인가전류에 따른 신호감쇄 특성

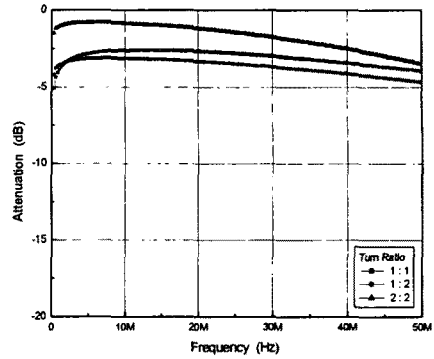


그림 6. 권선비에 따른 신호전송 특성의 변화

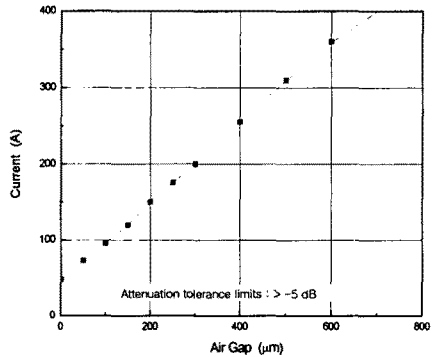


그림 7. Air gap에 따른 허용전류 변화

3. 결 론

1. 도체 케이스와 매칭소자를 이용한 고주파 임피던스 매칭을 포함하여 커플러를 구성함으로써 안정적인 고주파 대역의 신호전송 특성을 실현할 수 있었다.
2. 외경과 내경 및 높이가 각각 94, 64, 80 μ m인 자심재료를 사용하고, 약 500 μ m의 air gap을 형성시켜 2 ~ 40 MHz의 주파수 범위에서 -3 ± 2 dB의 신호전송 특성과 포화전류가 300 A 이상인 비접촉식 커플러를 제조할 수 있었다.
3. 권선비가 1 : 2인 경우 저주파 특성은 우수하지만 고주파 특성이 저하하였고, 권선비가 1 : 1인 경우에는 모든 주파수 영역에서 균일한 특성을 나타내었다. 권선비가 1 : 2인 경우는 저주파 대역에서 특성향상이 요구되는 경우에 적용될 수 있을 것으로 보인다.

[참 고 문 헌]

- [1] Bilal O., "Design of Broadband Coupling Circuits for Powerline Communication", 7th ISPLC Proceedings, 2004
- [2] 박경태, "UHF대역 3-dB 커플러(Coupler)를 이용한 가변 감쇄기(Attenuator)에 대한 연구", 신호처리 시스템학회, Vol. 3, No. 2, p68-74, 2001
- [3] 정법진, 이종호, "저압 배전망에서 전력선 통신을 위한 전력선 결합장치", 대한민국특허청, 10-0417330(등록), 2004