

전력선 통신용 Inductive Coupler의 특성

변우봉, 박병석*, 이태영*
한국전기연구원, 한국전력공사(전력연구원)*

Characteristics of inductive coupler for PLC(Power Line Communication)

W.B. Byun, B.S. Park*, T.Y. Lee*
KERI, KEPCO*

Abstract - PLC 시스템에서 사용되는 커플러는 전력선에 연결 형태에 따라 접촉식(Capacitive)과 비접촉식(Inductive)으로 분류된다. 특히 비접촉식 커플러에서 자기 코어(magnetic core)의 소재 특성은 커플러의 크기와 신호 손실 특성 등에 많은 영향을 준다. 본 논문에서는 비접촉식 커플러에서 자기 코어용 재료들의 물성 특성과 재료 물성 변화에 따른 전력선 통신에 미치는 영향을 분석하였다.

서 커플러는 변압기 권선과 주 도선(main conductor) 사이에 더 높은 주파수의 전력선 통신 신호를 쉽게 연결해 준다.

1. 서 론

전력선 통신이란 전력선을 매개체로 통신을 하는 것으로 기존 전화선, 광케이블을 이용한 유선 통신과 별개로 가입자 망을 구성할 수 있는 새로운 기술로 부가되고 있다. 이러한 전력선 통신은 배전선로의 전압에 따라 저압(보통 220V) 또는 고압(22.9KV)으로 분류되는데 여기서는 주로 고압 배전선로에 의한 전력선 통신에 국한하기로 한다.

현재 한국전력의 고압 배전선로망은 3상4선식의 가공지선과 케이블을 이용한 지중선로를 중심으로 구성되어 있다. 전력선 통신 신호를 이러한 고압배전선로에 주입하고 추출하기 위해서는 고압용 커플러가 필요하며, 커플러는 접촉식 커플러와 비접촉식 커플러로 구분된다.

접촉식 커플러는 비접촉식 커플러에 비해 신호손실이 적다는 장점을 가지고 있으나 절연문제에 의한 부피가 크고, 선로에 직접 부착해야하는 어려움과 위험성을 가지고 있다. 따라서 접촉식 커플러는 가공선로에서와 같이 전송거리가 긴 선로에서 신호손실이 적으면서 절연문제 및 태풍 등 기상변화에 대한 기계적 안전문제 등이 고려해야만 하는 곳에 적합하다. 반면, 비접촉식 커플러는 신호손실이 비교적 크다는 단점을 가지고 있지만 고압 지중선로에서와 같이 좁은 관로나 전력구에 직접 부착하기 어려울 때 주로 사용된다. 현재 미국에서는 가공선로용으로 주로 접촉식 커플러를 사용하며 유럽에서는 대부분이 시내선로의 지중케이블을 위한 비접촉식 커플러를 사용하고 있다.

본 논문에서는 접촉식과 비접촉식 커플러의 특징과 응용분야 및 국내에서 주로 사용하게 될 비접촉식 커플러에 대한 요구 특성이 조사되었으며 특히 비접촉식 커플러에서 사용된 자기 코어 소재 특성 및 재료 물성 변화에 따른 전력선 통신에 미치는 영향 등이 분석되었다.

2. 본 론

2.1 접촉식 커플러

접촉식은 그림 1처럼 변압기 권선(transformer winding)과 캐패시터(capacitor)를 직렬로 연결한 형태이다. 여기서 캐패시터는 변압기 권선에 60Hz의 전류 흐름을 차단시켜 주는 역할을 한다. 따라서 접촉식에

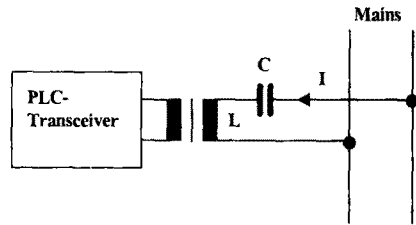


그림 1. 접촉식 커플링(capacitive coupling)의 원리 개념도

그리고 9kHz에서 450kHz 범위의 저주파 영역에서의 전력선 통신 기술은 자동검침장치(AMR, automatic meter reading)와 홈 오토메이션(home automation)에 응용분야를 가지고 있다. 이 경우에 전력선 통신 변압기의 권선을 통해 접촉식 커플러에 흐르는 전류는 자기 코어를 포화상태로 할 수 있으며, 변압기 인덕턴스(L)는 포화에 의해 크게 감소된다. 이로 인하여 전력선 통신 신호의 고조파(harmonics)가 야기될 수 있으며, 이는 주파수 밴드를 초과되는 현상을 가져온다.

그리고 1-30MHz의 고주파 영역에서의 전력선 통신 기술은 액세스 기술(access technology) 또는 홈 네트워킹(home networking) 등의 응용분야를 가진다. 고주파 전력선 통신에서 신호 커플링에 사용되는 캐패시터는 저주파보다 더 낮은 캐패시턴스를 가질 수 있으며, 이로 인하여 변압기 권선을 통해 흐르는 전류는 상대적으로 낮은 값을 갖는다. 이 경우 저주파에서 나타나는 변압기 코어의 포화보다는 변압기의 삽입 손실(insertion loss)이 중요하다. 이러한 거동은 낮은 누설 인덕턴스(leakage inductance)와 권선의 감은 수(turns)에 의해 의해 심화된다. 이의 개선책으로서는 높은 투자율(μ)을 갖는 자기 재료(magnetic materials)를 사용해야 한다.

2.2 비접촉식 커플러

비접촉식 커플링 시스템에서 전류는 그림 2와 같이 케이블 위에 죄어진 자기 코어를 통해 제한 없이 흐를 수 있다. 응용을 위해서는 높은 전류 값은 자기 코어의 포화와 관련하여 중요하다. 이러한 비접촉식 커플러가 주로 사용되는 22.9kV의 지중케이블에서 자기 코어의

기하학적인 크기는 포화자속과 관련하여 결정된다.

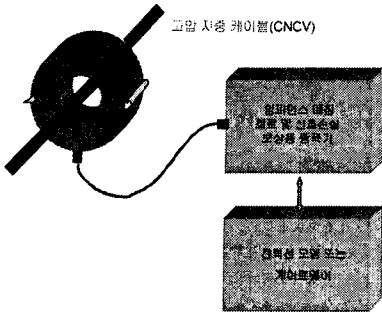


그림 2. 비접촉식 커플링의 개념도

이러한 비접촉식 커플러의 자기 코어는 air-gap(δ)를 갖는 "cut-core"라고 불린다. 그림 3은 그러한 코어의 측면을 나타낸 것이다. 여기서 d_a 는 외경, d_i 는 내경, h 는 높이, δ 는 air-gap이다. 여기서 air-gap δ 는 cut-core의 양쪽에 있어야 한다. 이러한 치수들을 사용해서 단면도 A_{Fe} 에 대한 공식이 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$A_{Fe} = \frac{1}{2} \pi (d_a - d_i) \cdot h$$

$$l_{Fe} = \pi \cdot (d_a + d_i)$$

$$V_{Fe} = A_{Fe} \cdot l_{Fe}$$

여기서, μ_{Fe} 는 자기재료의 충전율이다. 이 값은 금속합금에 대해서는 0.8이고, 페라이트에 대해서는 1이다. 코어의 유효 투자율 μ_e 는 air-gap에 의해 감소되며 다음과 같이 계산되어 진다.

$$\mu_e = 1 / (1/\mu + 2 \cdot \delta / l_{Fe})$$

여기서 유효 투자율 μ_e 는 주로 δ / l_{Fe} 의 비로 결정된다. 즉, 다른 자기 소재들의 μ_e 사이에 차이는 극히 작다.

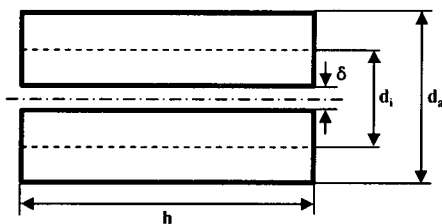


그림 3. 톨로이달 형태의 cut-core

흐르는 전류 I와 요구되는 인덕턴스 L에 의한 코어 안에서 자기 에너지 W는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$W = V_{Fe} \cdot j \cdot H \cdot dB$$

또한 W에 대한 다른 식은;

$$W = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 = \frac{1}{2} \cdot V_{Fe} \cdot B^2 / (\mu_e \cdot \mu_0)$$

따라서 요구되는 코어 재료의 체적 V_{Fe} 는 아래와 같이 계산될 수 있다.

$$V_{Fe} = L \cdot I^2 \cdot \mu_e \cdot \mu_0 / B^2$$

요구되는 코어 재료의 체적은 자속밀도 B의 제곱에 의존함에 따라 포화 자속밀도 B_s 가 높은 자기재료의 사용은 그 만큼 비접촉식 커플러에서 요구되는 코어의 크기를 감소시킬 수 있다.

2.3 코어 소재의 특성

커플러의 자기 코어 소재로 사용되기 위해서는 기계적 충격 또는 열적 안정성 등은 물론 수십 MHz의 넓은 주파수 범위에서 매우 엄격한 기술적인 요구를 만족해야 한다. 그러한 조건을 위해서 코어 소재는 다음과 같은 연자기 성질들의 우수한 특성들을 나타내는 것이 필요하다.

- ▣ 높은 자속 밀도를 얻기 위해 포화 유도(B_s)는 가능한 높은 값을 가져야 한다.
- ▣ 제어된 수준의 투자율과 잘 정의된 장방향을 가지는 히스테리 loop를 얻기 위해 축방향의 이방성(K_u)는 자장중 열처리에 의해 방향과 크기를 수정해야 한다.
- ▣ 투자율과 보자력의 높은 주파수 특성을 얻기 위해 히스테리와 와전류 손실은 가능한 낮아야 한다.
- ▣ 열적 안정성과 온도 특성이 우수해야 한다.
- ▣ 산업적인 측면에서 재료는 생산이 용이하여야 하고 코어로 제작이 쉬워야 하며, 전자부품으로의 작업이 쉬워야 한다.
- ▣ 소재는 가격이 낮아야 하며, 구하기 쉬워야 한다.

약 13년 전까지만 해도 위에서 언급한 어느 정도 성질들을 나타낸 연자기(soft magnetic) 재료들은 Permalloy, Sendust, Mn/Zn-ferrites와 비정질 Co-based 합금 등이다. 1988년 소량의 Cu와 Nb를 첨가한 Fe-(Si,B) 비정질의 결정화는 비정질의 기지(matrix)에 들어있는 10-15nm의 결정크기를 갖는 bcc-FeSi의 극히 미세한 결정구조를 만들어내는 것을 발견하였다. 게다가 이러한 새로운 초미세 결정질 합금(nanocrystalline alloy)은 퍼말로이와 Co-based 비정질 합금에 의해 얻어진 것보다 더 우수한 연자기 성질들을 나타내었다.

미세구조가 본질적으로 강자성 재료의 히스테리 loop를 결정한다는 것은 잘 알려져 있다. 그림 4는 비정질 합금에서 nanometer의 grain 크기(D)의 원자적 거리로부터 macroscopic grain 크기까지의 보자력(Hc)의 관계를 나타낸 것이다. 투자율은 본질적으로 Hc에 역비례 함으로서 비슷한 거동을 보여준다. grain 크기가 큰 경우, grain 크기에 따른 보자력의 의존성(1/D)은 좋은 연자기 성질은 매우 큰 grain($D > 100\text{nm}$)을 요구한다는 일반적인 규칙을 반영한다. 이렇게 domain wall 폭(width)의 영역까지의 입도 크기의 감소는 보자력(Hc)을 이방성(anisotropic)에 의해 제어되는 최대치 쪽으로 증가시킨다. 따라서 미세 입자를 갖는 시스템은 hard magnetic 재료로서 주로 토론되어 왔다. 그러나 가장 낮은 보자력은 비정질 합금(원자 거리의 "grain size")과 $D < 20\text{nm}$ 의 grain 크기를 갖는 초미세 결정질 합금에서 발견되어진다.

원칙적으로, nano-결정 합금들은 액체 상태에서 빠른 solidification, mechanical alloying, plasma processing과 vapor deposition과 같은 다양한 기술에 의해 합성할 수 있다. 연자기 성질에 필요한 미세구조를 제조하는 많은 방법들 중 극히 일부의 방법만 허용된다. 이렇게, 비정질 상태로부터 제어된 결정화는 원하는 연자기 성질을 갖는 nano-결정 합금을 합성하기 위

해 현재 허용되는 유일한 방법인 것처럼 보인다.

만일 비정질 상태에서 Fe-B 화합물과 같은 금속간 화합물 상(intermetallic phase)이 형성되기 전에 bcc Fe의 결정이 생성된다면, 좋은 연자기 성질을 갖는 전형적인 nano-결정구조가 나타난다. 매우 높은 핵형성속도와 낮은 결정 성장속도는 nano 크기의 미세구조를 얻기 위해 필요하다. 그런 결정화의 특색은 규칙보다는 예외인 것으로 보여지며 적당한 합금 설계로 얻어질 수 있다. 이렇듯 연자기 응용성을 위해 최적화된 기존의 상용화된 metallic glass의 결정화는 일반적으로 약 0.1-1 μ m의 입도 크기를 갖는 비교적 큰 미세구조를 가지고 있으며, 몇 종류의 결정들을 함께 포함한다. 그리고 이것은 연자기 성질을 저하시킨다.

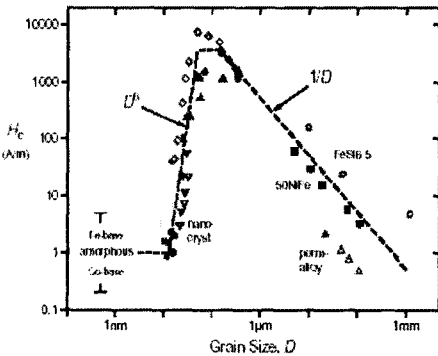


그림 4. 여러 가지 연자기 금속 합금에 대하여 grain size에 대한 보자력(Hc)의 변화 특성

처음으로 제안되어 지금까지 많이 변하지 않은 최적의 합금 조성은 $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$ (at%)이며, 미량의 Cu와 Nb(또는 W-V족)를 갖는 전형적인 Fe-Si-B metallic glass 조성으로 생각되어질 수 있다. Cu와 Nb가 함께 첨가된 것은 본질적으로 특별한 nano-결정 구조의 형성을 위해서이다. 여기서 Cu는 bcc grain의 핵생성을 증가시키고 Nb는 입도크기의 성장을 방해함과 동시에 boride 화합물의 형성을 방해한다. 그림 4는 annealing 온도에 따른 미세구조(입도 크기)와 연자기 성질(보자력, 투자율)의 변화를 나타낸 것이다. nano-결정 상태는 약 500 $^{\circ}$ C에서 600 $^{\circ}$ C사이의 온도에서 annealing에 의해 얻어진다. 이 온도에서 bcc Fe의 초기 결정화를 초래한다. 이렇게 얻어진 미세구조의 특색은 마구잡이식으로 분포되어 있으며, 10-12nm의 입도크기를 갖는 Fe-Si-20 at%의 극미세 입도들은 약 20-30%의 체적 분율을 갖는 잔류 비정질 matrix 속에 박혀 있는 형태를 띠고 있으며, 약 1-2 μ m의 거리만큼 서로 떨어져 분포되어 있는 형태를 취하고 있다. 이러한 미세구조의 특징은 약 10^5 의 높은 값의 초기 투자율-결과적으로 1 A/m보다 작은 낮은 보자력을 갖는 우수한 연자기 성질을 갖는다는 것이다. 자기적 성질과 미세구조는 약 $\Delta T_a \approx 50-100^{\circ}$ C의 넓은 annealing 온도(T_a) 범위에서 정확한 annealing 상태에는 차라리 둔감하다. 그리고 자기적 성질들과 미세구조는 상대적으로 짧은 시간(약 10-15분)에서 얻어지며 수 시간의 긴 열처리 동

안에서도 크게 변하지 않는다. 단지 약 600 $^{\circ}$ C위의 조금 더 높은 온도에서 annealing은 50m에서 100m의 크기를 갖는 Fe_2B 또는 Fe_3B 와 같은 boride 화합물의 석출을 초래하며, 그리고 bcc Fe-Si의 극미세 grain 구조는 계속해서 유지된다. 게다가 약 700 $^{\circ}$ C 위로 어닐링 온도의 증가는 입도의 성장(조대화)을 초래한다. Fe-boride의 형성과 grain coarsening(조대화)은 연자기 성질을 의미심장하게 해친다.

3. 결 론

1. 코아의 포화 자속이 결정적인 경우에 자기 소재의 선택에 의해 전력선 통신용 커플러의 크기와 비용을 절감할 수 있다.
2. 전력선 통신용 커플러에서 가장 중요한 점은 포화 유도(saturation induction, Bs)와 투자율(μ)로서 소재의 특성을 나타내는 인자들이다.
3. 비접촉식 커플러에서 페라이트 소재는 초미세 결정질 합금과 비교해서 상대적으로 낮은 포화 유도를 가지고 있다. 실제적으로 초미세 결정질 합금은 페라이트보다 약 4-8배 정도 커플러의 크기를 줄일 수 있다. 이는 높은 투자율에 의하여 고주파에서 더 좋은 삽입 손실을 나타낸다.