

Analysis of RF Inductive Couplers for Power Line Communication

전력선 통신의 RF 유도형 결합기 해석

Young Seok Noh†, Gunbok Lee, Wee Sang Park
노영석†, 이건복, 박위상

Pohang University of Science and Technology (POSTECH), 77 Cheongam-Ro, Nam-Gu, Pohang, Gyeongbuk, Korea

† nys2000v@postech.ac.kr

Abstract

전력선 통신에서 사용되는 비접촉식 커플러의 신호 전달 특성을 향상시키기 위한 비접촉식 커플러의 구조와 자기장 결합에 대한 연구를 수행하였다. 비접촉식 커플러의 결합 구조를 분석하였고, Rogowski 코일을 이용한 커플러와 자성체 코어를 이용한 커플러를 제작하여 구조에 따른 신호 전달 특성을 분석하였다. 집중 정수 소자와 임피던스 트랜스포머를 이용한 임피던스 매칭법을 제안하여 협대역과 광대역에서 신호 전달 특성을 향상시켰고 전달 신호의 크기는 대역폭과 트레이드오프가 있음을 보였다. 본 연구는 추후 부하 변동에 따른 임피던스 매칭 연구에 도움을 줄 수 있다.

We investigated the structure of inductive coupler and its magnetic coupling to increase the transmission coefficient for power line communication. A Rogowski coil, which is an air-cored inductive coupler, and a magnetic cored coupler were fabricated to analyze the transmission coefficient for different coupler parameters. This paper proposes the impedance matching method using lumped elements and an impedance transformer to increase the transmission coefficient. In the experiment, the transmission coefficient of the proposed system was increased in both narrowband and broadband cases, and a trade-off between the transmission coefficient and the bandwidth was shown. This method will be useful for the further study of impedance matching with the load variation.

Keywords: Power Line Communication, Inductive Coupler, Rogowski Coil, Magnetic core, Impedance Matching,

I. 서론

전력선 통신(Power Line Communication, PLC)은 60 Hz의 저주파 신호가 인가되는 기존의 전력선에 커플러(coupler)를 결합하여 수백 kHz ~ 수십 MHz의 고주파 통신 신호(carrier)를 실어 전송하는 기술로서, 추가적인 통신 선로의 설치 비용 없이 저비용으로 이미 광범위하게 설치되어 있는 전력선을 이용하여 통신망을 구축할 수 있기 때문에 꾸준히 각광받고 있으며 최근 원격 검침 시스템(Advanced Metering Infrastructure, AMI), 스마트 그리드(Smart Grid), 스마트홈(Home Automation) 시스템 등으로 활용되고 있다 [1].

전력선 통신의 핵심 기술은 전력선의 신호를 결합(coupling)하는 커플러로서, 전기장을 결합하는 컵형 커플러(capacitive coupler)와 자기장을 결합하는 비접촉식 커플러(inductive coupler)로 분류된다. 컵형 커플러는 가볍고 저가의 수동 소자를 사용하기 때문에 제조 단가가 낮고 각종 신호 손실 요소를 우회(bypass)할 수 있으며 삽입 손실이 작아 신호 전달 특성이 우수한 반면, 전력선과 물리적인 접촉을 해야 하기 때문에 설치가 불편하고 전기적 안정성이 떨어진다. 한편 비접촉식 커플러는 전력선과 물리적인 접촉 없이 결합이 가능하기 때문에 설치가 용이하고 전기적 안정성이 우수한 반면, 투자율이 높고 포화전류 특성이 높은 고가의 자성체 코어 물

질을 사용하므로 제조 단가가 비싸고 무거운 단점이 있다. 또한 삽입 손실이 비접촉식 커플러에 비해 크기 때문에 신호 전달 특성이 떨어진다. 이러한 특성으로 통상 컵형 커플러는 절연되지 않은 나전선을 철탑에 애자로 매달아서 연결해 주는 가공선로에서 주로 사용되며, 비접촉식 커플러는 절연된 전력선을 땅속에 매설하는 형태의 지중선로에서 주로 사용되고 있다 [2].

비접촉식 커플러는 비자성체인 공심(air-gap) 코어를 사용한 Rogowski 코일과 자성체 코어를 이용한 비접촉식 커플러로 분류할 수 있다. Rogowski 코일은 코어를 이용한 커플러에 비해 신호 전달 특성이 떨어지는 단점이 있음에도 불구하고, 전류의 증가에 따른 자성체 포화 특성이 없기 때문에 코어가 파괴되지 않아 대전력 배전 선로에서 사용하기에 적합하며, 넓은 대역폭의 주파수 응답 특성을 가지기 때문에 비접촉식 커플러로서 사용된다 [3]. 또한 자화 특성이 없어 선형성이 매우 우수하며 [4], 가볍고 제작이 용이하여 구성이 간편하고 제작 비용이 저렴하여 경제적으로 이용할 수 있다. 반면 자성체 코어를 이용한 비접촉식 커플러는 Rogowski 코일에 비해 신호 전달 특성이 뛰어나지만, 자성체가 포화되면 코어가 파괴될 수 있고 자성체의 비선형적인 특성으로 인해 커플러 변수들의 값을 구하여 해석하기가 매우 어렵다.

본 논문에서는 II장에서 비접촉식 커플러의 결합 구

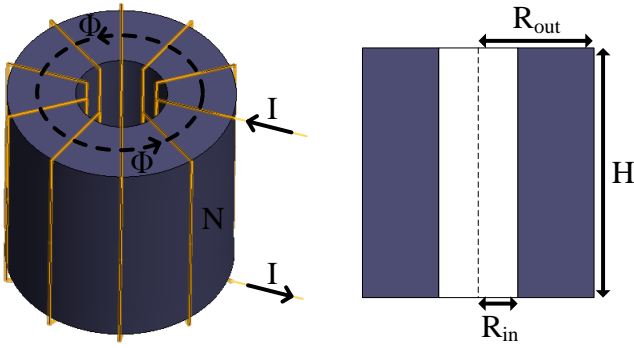


Fig. 1. 원통형 코어의 비접촉식 커플러

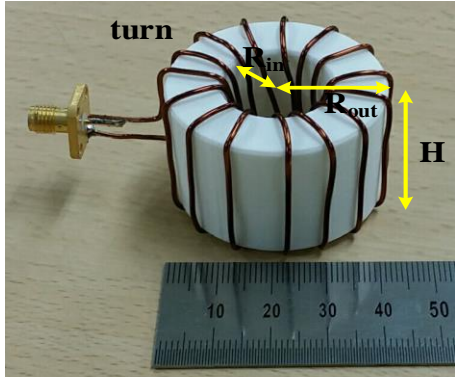


Fig. 2. Rogowski 코일

조를 알아보고, III장에서 Rogowski 코일의 구조에 따른 신호 전달 특성과 임피던스 매칭을 통한 신호 전달 특성 변화에 대해 실험하고 분석하였으며, IV장에서 자성체 코어를 이용한 비접촉식 커플러의 구조에 따른 신호 전달 특성과 임피던스 매칭을 통한 신호 전달 특성에 대해 실험하고 분석하였다. 마지막 V장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 비접촉식 커플러의 결합 구조

비접촉식 커플러는 대개 원통형(cylindrical) 코어에 권선이 토로이드 형태(toroidal)로 감겨 있는 구조로서, 커플러의 자속(magnetic flux)과 전력선의 자속이 결합되어 발생한 쇄교 자속(flux linkage)에 기인하여 동작한다. 쇄교 자속은 식 (1)과 같이 코어의 투자율(permeability)과 코어의 유효 쇄교 면적에 의하여 결정되며, 쇄교 자속이 많을수록 결합계수(coupling coefficient)와 상호 인덕턴스(mutual inductance)가 증가하여 커플러의 성능이 우수해진다.

$$\Lambda = N\Phi = \frac{\mu N^2 IH}{2\pi} \ln \frac{R_{out}}{R_{in}} \quad (1)$$

한편 비접촉식 커플러는 패러데이의 전자기 유도(Faraday's law of electromagnetic induction)에 의한 트랜스포머(transformer)로 간주할 수도 있으며, 코어의 자성체 성능과 권선 수에 의존하여 쇄교 자속이 변하고 커플러의 성능이 결정되는데 실제로는 다음의 영향이 추가적으로

Symbol	Description
Λ	쇄교 자속
N	권선수
Φ	상호 자속
μ	투자율
I	커플러에 흐르는 전류
H	높이
R_{in}	내측 반경
R_{out}	외측 반경

고려된다.

1. 자속의 손실(magnetic flux loss)과 누설 자속(leakage flux)에 의한 결합 계수의 감소 ($k < 1$)
2. 권선의 저항과 권선 간의 기생 커패시턴스(parasitic capacitance) 발생
3. 자속 변화로 인한 자기 이력 손실(hysteresis loss)과 교류 전압에 의한 와전류 손실(eddy current loss)

특히 세 번째의 자기 이력 손실과 와전류 손실은 철손(iron loss)으로서 커플러의 성능에 악영향을 미치는 주된 요인이며, 투자율은 높고 전기 전도도(conductivity)가 낮은 강자성체(ferromagnetic) 코어 재료를 선택함으로써 손실을 감소시킬 수 있다. 강자성체 재료로 널리 알려진 페라이트(ferrite) 코어는 9 kHz ~ 450 kHz 대역을 사용하는 저속 협대역 전력선 통신(Narrowband Power Line Communication) 또는 고주파를 차단하는 EMI 필터에 적합하며, 최근 1 MHz ~ 30 MHz 대역을 사용하는 고속 광대역 전력선 통신(Broadband Power Line Communication)에서는 와전류 손실이 매우 크기 때문에 코어로서 적합하지 않다. 따라서 고속 광대역 전력선 통신 대역에서 와전류 손실을 줄이기 위해서는 매우 얇은 강자성체 판을 적층한(laminated) 형태로 전기적으로 절연되고 투자율이 매우 높은 자성 물질을 사용해야 하며, 나노크리스탈린 물질(nanocrystalline material)이 자성체로서 그 대안이 된다. 하지만 비접촉식 커플러의 코어로 사용하기 위해서는 자기장의 세기에 따른 투자율의 비선형적(non-linear)인 특성으로 인해 와전류 현상과 자기 이력 현상으로 인한 손실을 최소화하는 구조가 되어야 하며, 권선수에 따라 변하는 유도 자기장과 손실의 관계는 실험적으로 분석되어야 한다.

III. Rogowski 코일을 이용한 커플러 실험

A. 구성

Rogowski 코일은 Fig. 2와 같이 Finebot사의 3D 프린트(FB-200DX)와 비자성체($\mu=1$) 재료인 ABS를 이용하여 다양한 권선수(5턴, 10턴, 15턴, 20턴)와 크기(내측 반경: 5 mm, 10 mm, 15 mm, 외측 반경: 15 mm, 20 mm, 25 mm, 높이: 20 mm, 30 mm, 40 mm)를 갖는 구조의 Rogowski 코일을 제작하였다. Rogowski 코일은 Fig. 3과 같이 단선의 직경이 1.38 mm이고, 길이가 50 cm인 절연전선에 결합하여 커플러에서 전력선으로 흐르는 전달 계수(S_{21})를 Agilent

社의 네트워크 분석기(Network Analyzer, N5231A)로 측정하였다.

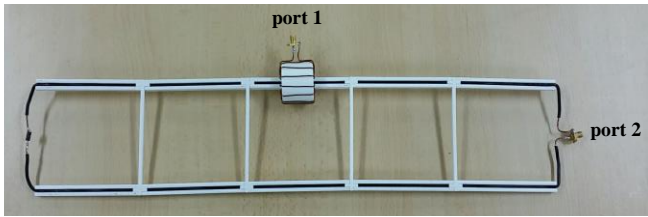


Fig.3. 전력선에 결합된 Rogowski 코일

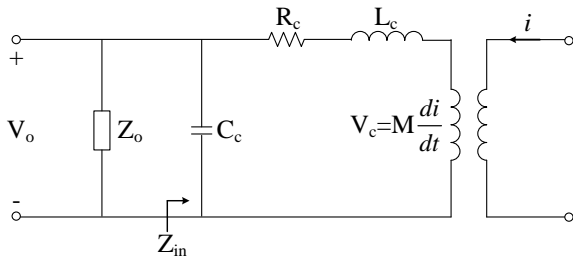


Fig.4. Rogowski 코일의 등가 회로

B. 신호 전달 특성

Rogowski 코일의 등가 회로 모델은 Fig. 4와 같이 해석할 수 있으며, 등가회로의 변수들은 Table 2에 설명하였다 [5]. Rogowski 코일의 구조가 일정한 경우 반사 계수(S₁₁)를 측정하여 식 (2)를 통해 구한 임피던스(Z_L)과 등가회로의 임피던스(Z_{in})를 유전 알고리즘(Genetic Algorithm)으로 최적화 분석(fitting analysis)을 통해 추출한 결과, Rogowski 코일의 변수들은 Table 3과 같이 주파수에 따라 변화하지 않고 일정한 값을 가졌다.

$$Z_L = Z_0 \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} \quad (2)$$

Fig. 5는 Rogowski 코일의 권선수(turns), 내측 반경(R_{in}), 외측 반경(R_{out}), 높이(H) 변화에 따른 전달 계수를 측정한 결과이다. Fig. 5(a)에서 권선수가 증가할수록 저주파 영역(1 MHz~5 MHz)에서는 전달 계수가 증가하였지만, 고주파 영역(5 MHz~30 MHz)에서는 전달 계수가 오히려 감소하였다. 이는 저주파 영역에서는 권선수가 증가함에 따라 상호 인덕턴스(M)가 증가하여 전달 계수가 증가하였지만, 고주파 영역에서는 증가한 상호 인덕턴스보다 코일의 기생 커패시턴스(C_c)의 증가로 인한 유기 전압(V_c)의 손실이 더욱 크게 발생하였다고 볼 수 있다. Fig. 5(b), (c)에서 코일의 내측 반경이 작을수록 전달 계수가 증가하였지만, 외측 반경이 증가할수록 전달 계수는 뚜렷하게 증가하지 않았다. 이는 코일 내측의 자기장이 코일 외측의 자기장보다 훨씬 강하기 때문에 쇄교하는 자속은 코일 내측의 크기에 더욱 큰 영향을 받는다고 볼 수 있다. Fig. 5(d)에서 코일의 높이가 증가할수록 전달계수가 증가하였다. 이는 반경에 따른 자기장의 세기는 일정하지만 총 쇄교 자속이 코일의 높이에 비례하여 증가하였기 때문이다. 따라서 Rogowski 코일의 신호

전달 특성은 특정 권선수(제작한 Rogowski 코일에서는 15턴)의 내측 반경이 작고, 높이가 긴 구조에서 가장 우

Table 2. Rogowski 코일의 등가회로 구성

R _c	코일의 저항
L _c	코일의 자기 인덕턴스
V _o	출력 전압
Z _o	코일의 종단 임피던스
C _c	코일의 기생 커패시턴스
V _c	유기 전압
M	상호 인덕턴스
i	2차측에 흐르는 전류
Z _{in}	코일에서 바라본 전체 임피던스

Table 3. 유전 알고리즘으로 추출한 Rogowski 코일의 변수(변수 이외의 고정값: 내측 반경=10 mm, 외측 반경=20 mm, 높이=30 mm)

Turns (N)	R _c (Ω)	L _c (μH)	C _c (pF)
10	0.1330	0.8711	2.3994
15	0.1387	1.6118	3.0880
20	0.1443	2.7841	3.5405

수하다는 것을 알 수 있다.

C. 임피던스 매칭을 통한 신호 전달 특성 향상

Rogowski 코일은 등가회로의 변수들이 일정하고 선형성이 우수하여, Fig. 6과 같이 집중 정수 소자 또는 임피던스 트랜스포머를 이용한 임피던스 매칭을 통하여 신호 전달 특성을 크게 향상시킬 수 있다. 특히 Rogowski 코일은 자기 이력 손실이나 와전류 손실이 없으므로 코일의 손실만 고려하면 되고, 그 값이 매우 작기 때문에 Rogowski 코일에서 바라본 전체 임피던스(Z_{in})는 대부분 리액턴스 성분만 존재한다고 볼 수 있다. 따라서 대역 통과 필터(Band Pass Filter)를 구현하여 공진점(resonance point)을 형성하는 임피던스 매칭법으로 협대역 신호 전달 특성을 향상시켰고, 2개의 공진점을 형성하는 대역 통과 필터와 Pulse社의 0.6 dB의 삽입 손실을 갖는 1:2 권선비 임피던스 트랜스포머를 사용하여 광대역 신호 전달 특성을 향상시켰다. 특정한 구조의 Rogowski 코일(권선수=15, 내측 반경=10 mm, 외측 반경=20 mm, 높이=30 mm)을 사용하였으며, 제작한 임피던스 매칭부를 Rogowski 코일에 연결하여 전달 계수를 측정하였다.

1) 협대역 임피던스 매칭법

협대역 임피던스 매칭을 위해 Fig. 6의 case I과 case II의 임피던스 매칭부를 이용하였다. Case I은 Rogowski 코일의 인덕턴스(inductance) 성분과 함께 직렬 공진(series resonance)을 일으켜 Fig. 7(a)와 같이 1개의 공진점이 발생하였으며, 대역 통과 필터의 특성을 나타내었다. 식 (3)과 같이 커패시터의 값이 증가할수록 공진점이 낮아졌으며, 공진점에서의 전달 계수는 10 dB (82 pF 경우)~15 dB (22 pF 경우) 개선되었지만, 대역폭은 33% (82 pF

경우) ~ 62% (22 pF 경우) 감소하였다. 공진 주파수가 낮을수록 대역폭이 넓어졌지만 전달 계수는 감소하여 대역폭과 전달 계수는 트레이드오프(Trade-off) 관계가 있었다.

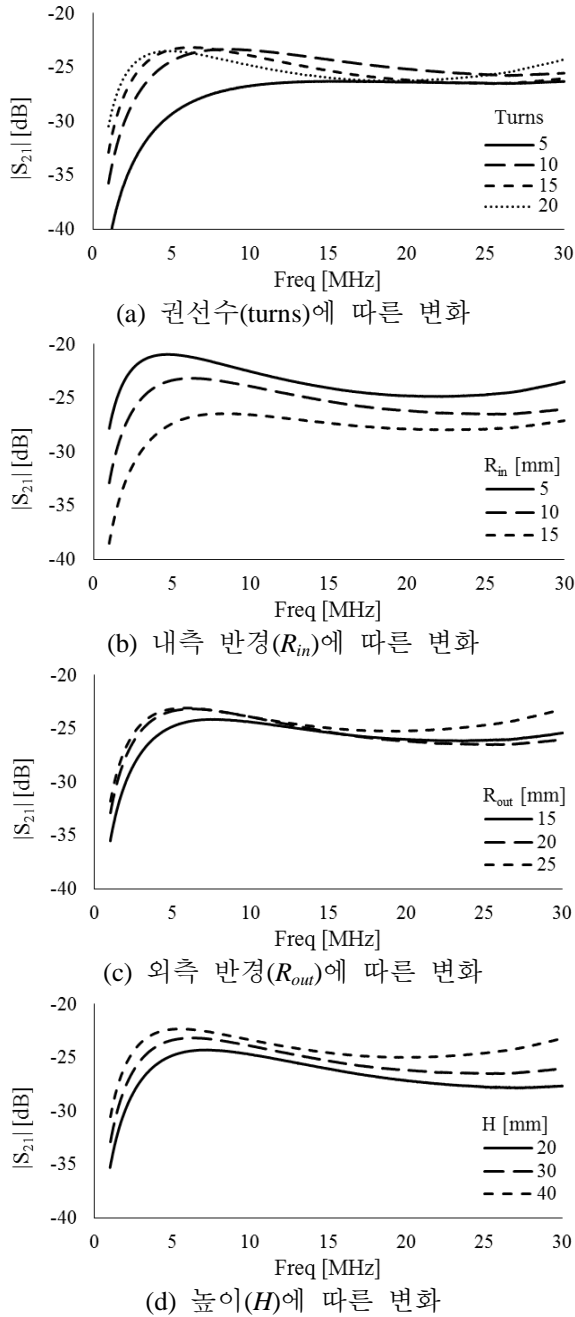


Fig.5. Rogowski 코일의 권선수, 크기 변화에 따른 전달 계수(S_{21}) (변수 이외의 고정값: 권선수=15턴, 내측 반경=10 mm, 외측 반경=20 mm, 높이=30 mm)

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3)$$

Case II는 Rogowski 코일의 인덕턴스 성분과 직렬 공진을 하여 Fig. 7(b)와 같이 Q값(Q-factor)이 높은 대역 통과 필터의 특성을 나타내었으며, 직렬 커패시터만 사용했을 때와 마찬가지로 커패시터의 값이 증가할수록

공진점이 낮아졌다. 공진점에서의 전달 계수는 19 dB (병렬 커패시터가 82 pF인 경우)~22 dB (병렬 커패시터가 22 pF인 경우) 크게 개선되었지만, 대역폭은 83% (병렬 커패시터가 22 pF인 경우)~96% (병렬 커패시터가 82 pF인

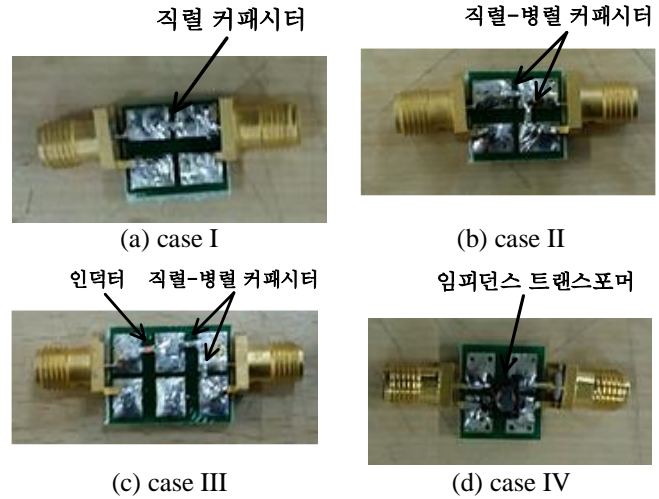


Fig.6. 집중 정수 소자를 이용한 임피던스 매칭부와 임피던스 트랜스포머를 이용한 임피던스 매칭부. (a) 직렬 커패시터. (b) 직렬-병렬 커패시터. (c) 직렬 인덕터와 직렬-병렬 커패시터. (d) 임피던스 트랜스포머.

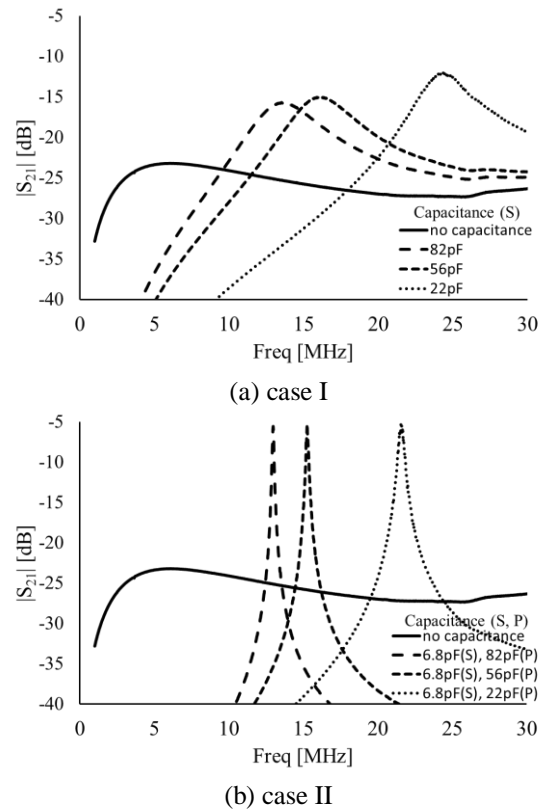
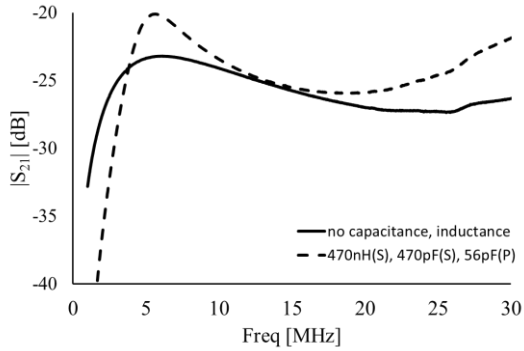


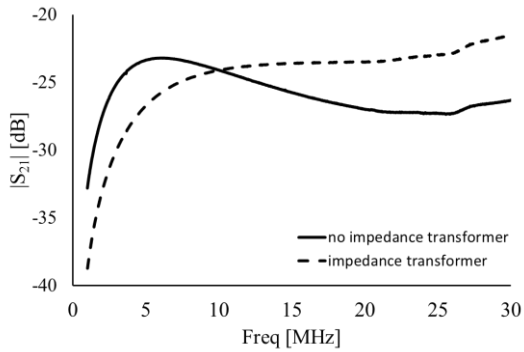
Fig.7. 협대역 임피던스 매칭부를 결합한 Rogowski 코일의 전달 계수(S_{21}). (a) case I: 직렬 커패시터. (b) case II: 직렬-병렬 커패시터.

경우)로 감소하였고, 공진 주파수가 높을수록 대역폭이 넓어졌다. 따라서 이와 같은 협대역 임피던스 매칭법은

대역폭이 낮은 반면 전달 계수가 높기 때문에 낮은 대역폭의 신호를 안정적으로 전송해야 하는 경우 적용 가능할 것이다.



(a) case III



(b) case IV

Fig. 8. 광대역 임피던스 매칭부를 결합한 Rogowski 코일의 전달 계수(S_{21}). (a) case III: 직렬 인덕터와 직렬-병렬 커패시터 (b) case IV: 임피던스 트랜스포머

2) 광대역 임피던스 매칭법

광대역 임피던스 매칭을 위해 Fig. 6의 case III와 case IV의 임피던스 매칭부를 이용하였다. Case III는 Rogowski 코일의 인덕턴스 성분과 2차의 공진을 하여 Fig. 8(a)와 같이 광대역 매칭이 되었다. 대역폭과 전달 계수는 트레이드 오프 관계가 있어 대역폭은 10% 감소하였지만, 1차 공진 주파수와 2차 공진 주파수에서의 전달 계수는 각각 3 dB, 4.5 dB 개선되었다. Case IV는 임피던스 트랜스포머의 권선비가 증가함에 따라 신호 전달 특성은 향상되지만 대역폭이 줄어드는 트레이드오프 관계가 있었고, 1:2 권선비의 임피던스 트랜스포머를 사용하여 Fig. 8(b)와 같이 광대역 매칭이 되었다. 대역폭은 31% 줄어들었지만, 전달 계수는 최대 4.8 dB 개선되었다.

IV. 자성체 코어를 이용한 커플러 실험

A. 구성

자성체 코어는 자성체의 공진 주파수 이상에서 자성체의 기능을 상실하여 커플러의 신호 전달 능력이 급격하게 저하되기 때문에 1 MHz~30 MHz 이상의 대역에서 공진 주파수를 가지며, 투자율, 포화 자속 밀도

(saturation induction), 항자력(coercivity)이 높은 매트론社의 나노크리스탈린 물질을 Fig. 9와 같이 자성체 코어(내측 반경=10 mm, 외측 반경=24 mm, 높이=8 mm)로 사용

Table 4. 자성체 코어를 이용한 비접촉식 커플러의 등가회로 구성

R_{eq}	코일의 저항
X_{eq}	코어의 자기 리액턴스
V_o	출력 전압
Z_0	코일의 종단 임피던스
R_c	코어의 와전류 손실
X_m	코어의 자기 이력 손실
C_l	코일의 기생 커패시턴스

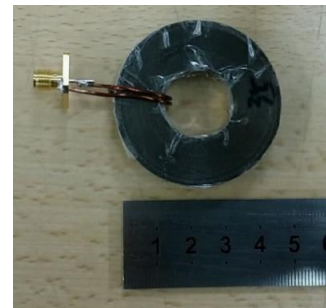


Fig. 9. 코어를 이용한 커플러

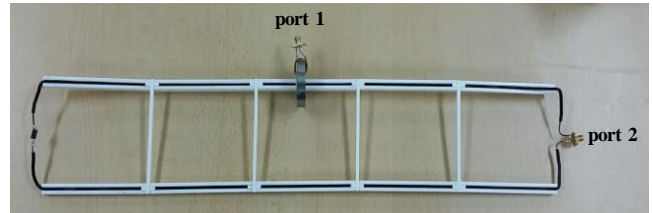


Fig. 10. 전력선에 연결된 코어를 이용한 커플러

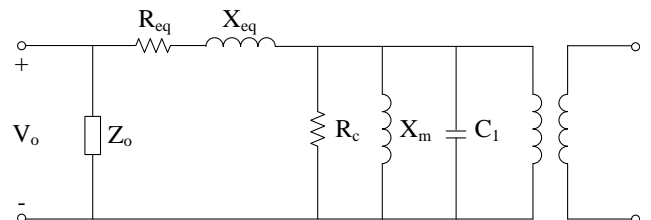


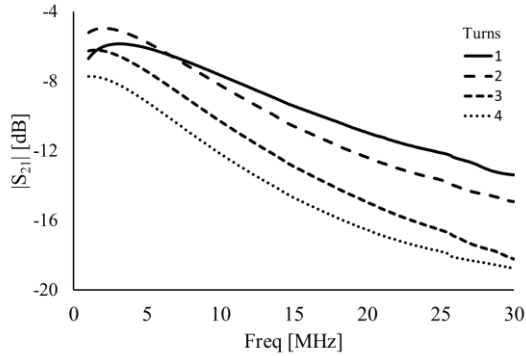
Fig.11. 자성체 코어를 이용한 비접촉식 커플러의 등가회로

하였다. 나노크리스탈린은 Fe, Si, B와 소량의 Cu, Mo, Nb, Ni, Co 로 구성된 strip 형태의 합금으로서 온도 안정성과 내식성이 높으며 손실이 작기 때문에 비접촉식 커플러로서 우수한 성능을 나타낸다 [6]. 제작된 커플러는 Fig. 3과 같은 방법으로 Fig. 10과 같은 환경에서 측정되었다.

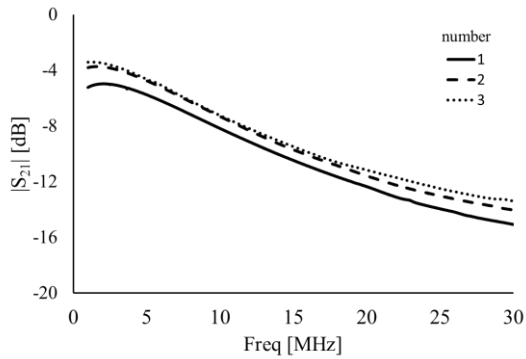
B. 신호 전달 특성

자성체 코어를 이용한 비접촉식 커플러의 등가 회로 모델은 코일-대지의 기생 커패시턴스와 전력선-커플러의 기생 커패시턴스가 매우 작은 것을 고려하면 Fig. 11

과 같이 해석할 수 있으며, 등가회로의 변수들은 Table 4와 같이 나타낼 수 있다 [7]. 자성체 코어를 이용한 비접촉식 커플러는 Rogowski 코일과 달리 자성체의 와전류 손실과 자기 이력 손실이 발생하고 자성체의 비선형 자



(a) 권선수(turns)에 따른 변화



(b) 코어의 개수(number)에 따른 변화

Fig. 12. 자성체 코어를 이용한 비접촉식 커플러의 권선수, 코어의 개수 변화에 따른 전달 계수(S_{21}) (변수 이외의 고정값: 권선수=2턴, 내측 반경=10 mm, 외측 반경=24 mm, 높이=8 mm)

화 현상으로 인해 각각의 변수들은 주파수와 전류의 세기에 따라 해석적으로 결정된다.

Fig. 12는 자성체 코어를 이용한 비접촉식 커플러의 권선수, 코어의 개수에 따른 전달 계수(S_{21})을 측정한 결과이다. 주파수가 증가할수록 자성체 코어의 와전류 손실(R_c)과 자기 이력 손실(X_m)이 증가하여 전달 계수가 크게 감소하였다. Fig. 12(a)에서 권선수가 2턴까지 증가하여도 저주파 영역(1 MHz~5 MHz)에서는 유도 자기장에 의한 코어의 상호 인덕턴스가 증가하여 전달 계수가 증가하였지만, 권선수가 3턴이 넘어가면 저주파 영역에서도 코어의 손실이 발생하여 전달 계수가 감소하였다. 고주파 영역(5 MHz~30 MHz)에서는 권선수가 증가할수록 코어의 손실이 증가하여 전달 계수가 감소하였다. 코어의 개수가 증가함에 따라 Fig. 12(b)에서 전달 계수가 증가함을 보였는데 유효 면적에 비례하여 쇠교 자속이 증가하기 때문이다.

C. 임피던스 매칭을 통한 신호 전달 특성 향상

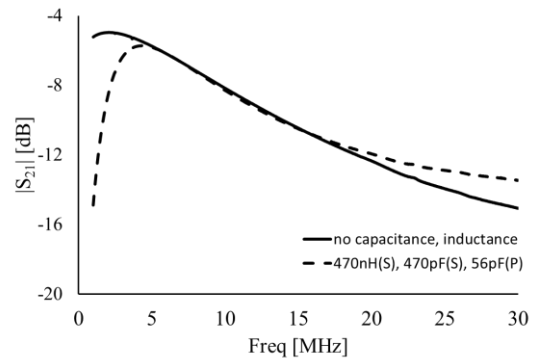
1개의 자성체 코어(권선수=2턴, 내측 반경=10 mm, 외측 반경=20 mm, 높이=30 mm)를 사용하여, Fig. 6에서 제시된 임피던스 매칭부와 연결하여 전달 계수를 측정

하였으며, Rogowski 코일과 비교하여 자성체 코어의 손실이 크기 때문에 Q값이 낮아 Rogowski 코일의 임피던스 매칭에 비해 대역폭이 넓게 나타났고 대역폭과 전달 계수는 트레이드오프 관계가 있어 전달 계수는 작게 나타났다. Fig. 6의 case I과 case II의 임피던스 매칭부를 자성체 코어를 이용한 비접촉식 커플러와 연결하면 넓은 대역폭에 비해 전달 계수가 작게 나타나 사용하기에 부적합하였다. 반면 Fig. 6의 case III과 case IV의 임피던스 매칭부는 광대역 매칭 특성을 가지고 있어 사용하기에 적합하였다. Fig. 13(a)에서 case III는 대역폭이 51% 줄어들었지만 전달 계수는 최대 1.6 dB 개선되었고, Fig. 13(b)에서 case IV는 대역폭이 24% 줄어들었지만 전달 계수는 최대 1.7 dB 개선되었다.

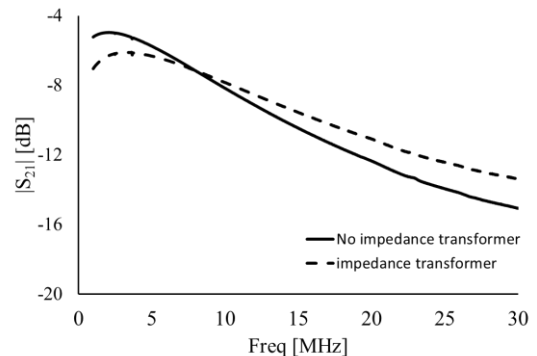
V. 결론

본 논문에서는 비접촉식 커플러의 결합 구조를 분석하고, Rogowski 코일을 이용한 비접촉식 커플러와 자성체 코어를 이용한 비접촉식 커플러를 제작하여 구조에 따른 신호 전달 특성을 분석하였다. Rogowski 코일과 전력선의 쇠교하는 자속은 구조적으로 코일 외측 반경보다 코일 내측 반경의 영향을 많이 받았으며, 전체 유효 면적이 커질수록 전달 계수는 증가하였다. 또한 권선수가 증가할수록 전달 계수는 증가하였으나, 특정 권선수(15턴)까지만 유효하였다. 자성체 코어를 이용한 비접촉식 커플러는 저주파 대역(1 MHz~5 MHz)에서 특정 권선수(2턴)의 전달 계수는 증가하였지만, 권선수가 증가하고 고주파 대역(5 MHz~30 MHz)으로 갈수록 전달 계수는 감소하였다.

집중 정수 소자 또는 임피던스 트랜스포머를 이용



(a) case III



(b) case IV

Fig.13. 광대역 임피던스 매칭부를 결합한 자성체 코어를 이용한 비접촉식 커플러의 전달 계수(S_{21}) (a) case III: 직렬 인덕터와 직렬-병렬 커패시터 (b) case IV: 임피던스 트랜스포머

하여 임피던스 매칭부를 제작하였으며, Rogowski 코일을 이용한 비접촉식 커플러와 결합하여 협대역인 경우와 광대역인 경우의 임피던스 매칭을 하였고 전달 계수와 대역폭은 트레이드 오프 관계를 보였다. 동일한 임피던스 매칭부를 자성체 코어를 이용한 비접촉식 커플러와 결합하여 광대역 임피던스 매칭법만 유효한 것을 확인하였다.

제안된 방법을 응용하면 향후 부하 변동에 따른 임피던스 매칭법 연구에 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 한국전력공사의 재원으로 기초전력연구원의 2014년 선정 기초연구개발과제의 지원을 받아 수행된 것임. (과제번호: R14XA02-47)

This research was supported by Korea Electric Power Corporation (KEPCO) through Korea Electrical Engineering & Science Research Institute. (grant number: R14XA02-47)

REFERENCES

- [1] H. C. Ferreira, L. Lampe, J. Newbury, and T. G. Swart, *Power Line Communications: Theory and Applications for Narrowband and Broadband Communications over Power Lines*. Wiley, 2011.
- [2] 임은혜 박병석 김영현 최인지 명노길, “효율적 원격 검침시스템 구축을 위한 집중장치간 연계통신 방법 설계 및 성능 테스트,” *전기학회논문지*, vol. 59, pp. 2337–2343, 2010.
- [3] D.-S. In, S. Shon, and J.-J. Lee, “A study on the implementation of inductive coupler with rogowski coil for BPLC,” in *Advanced Technologies for Communications, 2008. ATC 2008. International Conference on*, 2008, pp. 327–330.
- [4] G. M. Hashmi, *Partial discharge detection for condition monitoring of covered-conductor overhead distribution networks using Rogowski coil*. Teknillinen korkeakoulu, 2008.
- [5] M. Argüeso, G. Robles, and J. Sanz, “Measurement of high frequency currents with a Rogowski coil,” *Rev. Sci. Instrum*, vol. 76, no. 6, pp. 65101–65107, 2005.
- [6] 김현식, 이동철, 김민호, 이진, 오영우, and 민병훈, “송전선용 비접촉식 커플러의 설계와 적용연구,” *전기전자재료학회논문지*, vol. 23, no. 3, pp. 234–239, 2010.
- [7] M. Spahiu and H. P. Partal, “High frequency modeling and impedance matching of power transformers for PLC applications,” *Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 2014 IEEE PES*. pp. 1–5, 2014.

[1] H. C. Ferreira, L. Lampe, J. Newbury, and T. G. Swart, *Power Line Communications: Theory and Applications for Narrowband and Broadband Communications over Power*