

## 저전류 영역에서 로고우스키 코일 특성

### Characteristics of Rogowski coil at Low Current Region

박정남<sup>\*</sup>, 이강원<sup>\*</sup>, 이청<sup>\*</sup>, 김길수<sup>\*\*</sup>, 박영국<sup>\*\*\*</sup>, 강성화<sup>\*\*\*\*</sup>, 임기조<sup>\*</sup>

J. N. Park<sup>\*</sup>, K. W. Lee<sup>\*</sup>, C. Lee<sup>\*</sup>, K. S. Kim<sup>\*\*</sup>, Y. G. Park<sup>\*\*\*</sup>, S. H. Kang<sup>\*\*\*\*</sup>, K. J. Lim<sup>\*</sup>

#### Abstract

Conventionally, air-cored Rogowski coil was designed for use as high alternating and transient current sensor without saturation caused by ferromagnetic material in its core. This paper investigated that Rogowski coil can be applied to low current measurement in 60Hz power line. Measured parameters R, L of coil were compared with theoretically calculated values. Output voltages crossed by Rogowski coil have shown some linearity according to input current(tens to thousands of amperes) passing through it. And also shielding effect for external noises was investigated for three cases.

**Key Words :** Rogowski, Current measurement, Inductance, Sensor

#### 1. Introduction

로고우스키 코일은 상호인덕턴스를 이용하는 전류 측정 센서로서 1차측 전류에 의해 발생하는 자속을 측정하여 페루프의 코일에 유기되는 전압을 측정한다. 이러한 로고우스키 코일이 갖는 가장 큰 장점은 자성체를 코어로 이용하는 기존의 CT와는 달리 공심이거나 비자성재료( $\mu_r=1$ )를 사용하기 때문에 자기적으로 포화되지 않는다는 것이다[1, 2]. 따라서 과전압에 대한 손실이 없어 대전류에서도 선형적이고

대전류 측정일수록 기하학적 크기가 커지는 일반 전류 측정센서와는 달리 센서의 크기가 측정 전류의 크기에 의존하지 않는다. 또한 넓은 주파수 범위에서도 측정이 가능하며 1차측 도체와 전기적으로 연결되어있지 않아 단락전류에 강하고 출력이 전압의 형태이므로 다른 디지털 보호 릴레이를 구동시킬 수도 있다[1, 3]. 그리고 코일을 1차측 도체에 감기만 하면 되는 간단한 사용법으로 인해 대전류 방전장치, 고온 플라즈마 발생장치 및 고속 스위칭 전력전 자회로등에서 전류 측정센서로서 많이 이용되고 이외에도 대전력 송수신 안테나 출력측정과 같은 공중 파전류의 측정에도 사용되어 왔으며 현재까지도 이러한 분야에서 로고우스키코일의 이용에 대한 연구가 활발하다[4, 5, 6]. 그러나 고주파 대전류 측정센서로서는 많이 이용되고 있으나, 대전류와는 달리 상용주파에서 저전류에 대한 측정센서로서의 적용은 적으며, 연구 또한 미흡한 실정이다. 이는 저전류에

\* 충북대학교 전기공학과

\*\* LG 산전

\*\*\* 국립과학수사연구소

\*\*\*\* 충청대학 산업안전과

( 충북 청주시 흥덕구 개신동 산 48

FAX : 043-261-2424

E-mail : sky-sunset@hanmail.net )

서의 선형성이 문제로 제기되고 있기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 저전류에서 대전류에 이르는 영역에서 선형성을 만족하는 로고우스키 코일을 개발하기 위하여 저전류에서의 코일 특성을 개선시키는 연구를 하였다.

## 2. 실험 방법

실험에 사용한 로고우스키 코일은 코일의 피치를 0.43으로 하여 직경 9mm 코어에 에나멜 코팅된 직경 0.3mm 구리선을 1000(2326turn/m) turn을 감은 것으로 그 총 길이는 44cm이다. 다음 그림은 로고우스키 코일의 구조를 나타낸 것이다.

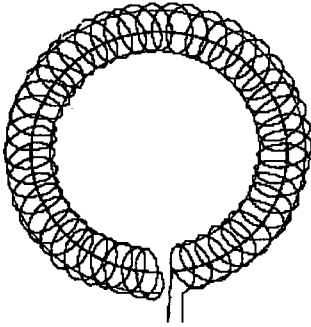


그림 1. 로고우스키 코일  
Fig. 1 Rogowski coil

임피던스  $Z$ , 위상  $\theta$ , 인덕턴스  $L$ , 저항  $R$ 은 Impedance Analyzer를 사용해 HP VEE로 측정하였고, 전류의 크기에 따른 출력은 오실로스코프 (Lecroy 9310)를 이용해 측정하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 특성 parameter 측정

로고우스키 코일을 Impedance Analyzer (HP4194A)를 이용하여  $Z$ ,  $\omega L$ ,  $\theta$ 와 인덕턴스를 측정된 결과를 그림 2와 3에 나타내었다. 그림 2와 3에서 보여지는 것과 같이 로고우스키 코일은 어느 주파수까지는 거의 일정한 임피던스를 가지지만 1.2MHz 부근에서 공진을 하게 된다. 이는 코일 자체의  $L$ 과 외부 자계에 의한 영향을 줄이기 위해 만든 return coil과 coil 사이에 발생하는 커패시턴스  $C$ 의 공진에 의한 것으로 생각된다[6]. 그러나 단락 전류가 발생하는 주파수 대역은 공진 주파수 이하의 영

역이므로 실제 측정에서 문제가 되지않으므로 1MHz 이하의 주파수에서 단락전류나 상용주파수(60Hz) 전류의 측정시 로고우스키 코일의 적용은 유효하다.

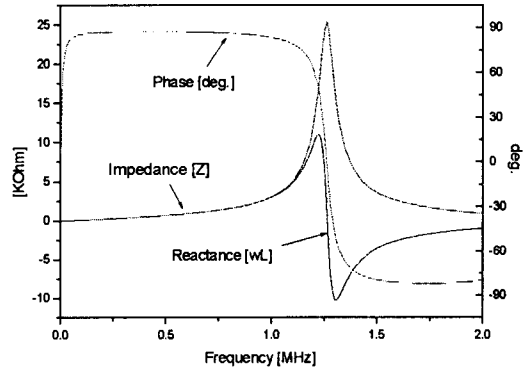


그림 2. 로고우스키코일의  $Z$ ,  $\omega L$ ,  $\theta$  주파수 특성  
Fig. 2 Frequency dependence of  $Z$ ,  $\omega L$  and  $\theta$

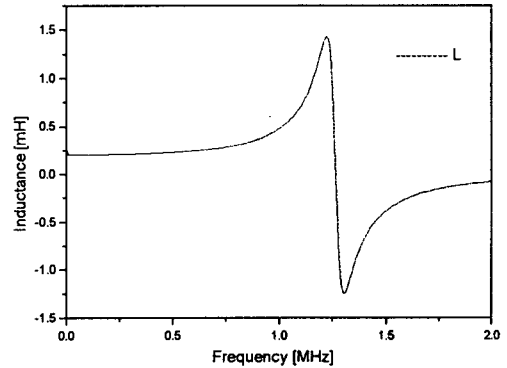


그림 3 로고우스키 코일의 인덕턴스  $L$ 의 주파수 특성

Fig. 3 Frequency dependence of  $L$

### 3.2 로고우스키 코일의 출력 비교

오실로스코프를 이용하여 20A에서 차폐를 하지 않은 로고우스키 코일의 출력은 그림 4이다. 그림 4에서 보여지듯이 차폐를 하지 않은 코일의 출력은 많은 noise를 포함하고 있다.

따라서 noise의 영향을 줄이기 위해 차폐제로서 알루미늄 테이프를 사용해 20A, 60Hz에서 로고우스키 코일의 출력 전압을 측정을 하였다.

그림 5는 알루미늄으로 차폐를 한 코일에서의 출력을 나타낸 것으로 차폐를 하지 않은 코일에서의

출력보다 noise의 영향이 많이 감소한 것을 알 수 있다[7].

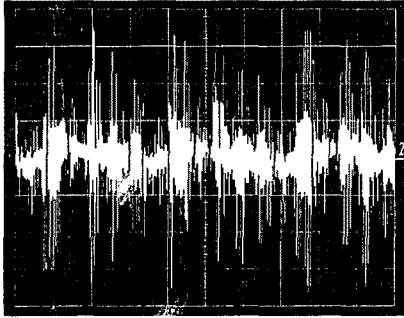


그림 4 차폐를 하지 않은 코일의 출력파형  
Fig. 4 Output waveform of unshielded coil

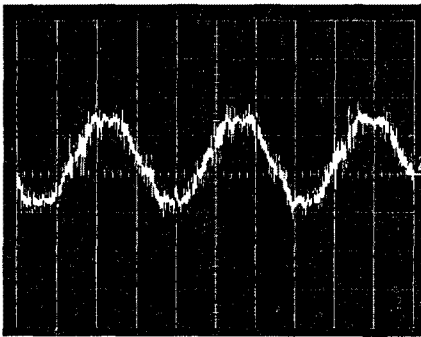


그림 5 알루미늄 테이프로 차폐된 코일에 대한 출력 파형

Fig. 5 Output waveform of coil shielded with aluminum tape.

이상의 결과를 이용해 60Hz에서 알루미늄으로 차폐를 한 로고우스키 코일을 전류의 크기에 따라 결과를 측정하여 표 1에 나타내었다.

표 1에서 Rogowski coil의 출력전압을 계산하기 위하여 적용한 식은 다음 식과 같다.

$$e_0 = M \frac{di(t)}{dt}$$

$$M = \frac{\mu_0}{2\pi} n W \ln \frac{a}{b}$$

여기서,  $M$ 은 상호인덕턴스,  $i$ 는 입력전류,  $n$ 은 코일의 턴수,  $W$ 는 코일의 두께,  $a$ 는 코일의 내경,  $b$

는 코일의 외경이다.

표 1은 저전류 영역에서 부하전류의 크기를 변화시키며 측정된 Rogowski coil의 출력전압과 측정전류에 해당하는 전류크기에서 계산한 출력전압 값이다. 저전류에서 로고우스키 코일의 측정 결과 이론값과 약 6~7%의 오차를 나타내고 있고, 고전류 영역에서는 약 3~4%의 오차를 보이고 있다.

표 1. 로고스키 코일 출력전압의 측정 및 계산 결과의 비교

Table 1. Measured and calculated output voltages of Rogowski coil.

부하전류[A]	측정값[mV]	이론값[mV]	오차
10	0.75	0.7	7.1%
20	1.49	1.4	6.4%
30	2.23	2.1	6.2%
40	3.01	2.8	7.5%
50	3.63	3.5	3.7%
100	7.28	7	4.0%
302	22.16	21.14	4.8%
621	45.2	43.47	2.4%
1004	74.4	70.28	5.7%
1490	108.4	104.37	3.9%

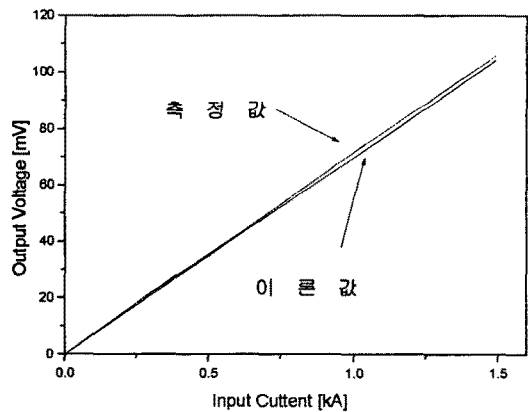


그림 6. 로고스키 코일 출력전압-부하전류

Fig. 6 Measured and calculated output voltages of Rogowski coil.

그림 6은 표 1을 이용해 입력 전류에 따른 코일의 출력값과 이론값을 도식적으로 나타낸 것이다. 그림 6에서 알 수 있는 바와 같이 실측한 로고우스키 코일의 출력값은 계산된 값과 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 또한 측정 및 계산 전류의 전 영역에 걸쳐서 출력전압과 부하전류는 좋은 선형성을 보여주고 있다. 따라서 본 연구에서 적용한 Rogowski coil 설계 알고리즘은 유효한 것으로 생각된다.

#### 4. 결론

저전류 영역에서의 Rogowski coil의 출력특성을 검토하기 위하여 모델을 설계하여 출력전압을 계산하고, 설정한 모델의 타당성을 검증하기 위하여 Rogowski coil 제작하고 출력전압을 측정/검토한 결과 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 1MHz 이상의 주파수에서 공진이 발생하므로 단락전류나 상용주파수(60Hz)에 대한 전류측정센서로서 로고우스키 코일의 사용은 유용하다.
- (2) 저전류에서 차폐를 하지 않은 코일은 외부의 영향이 매우 크므로 저전류에서 로고우스키 코일은 반드시 차폐하여야 한다.
- (3) 저전류에서 로고우스키 코일의 측정 결과 이론값과 6~7%의 오차를 나타내었다
- (4) 전류의 크기에 관계없이 로고우스키 코일은 그 측정값에서 선형성을 보였다.
- (5) 저전류 영역에서 로고우스키 코일의 특성을 개선하기 위해서는 차폐에 대한 연구가 더욱 진행되어야 한다.

#### 참고 문헌

- [1] John D. Ramboz "Machinable Rogowski Coil, Design, and Calibration" IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol.45, No.2, April 1996
- [2] R.L.Stoll, "Method of Measuring Alternating Currents without Disturbing the Conducting Circuit", Proc.IEE, Vol.122 No.10, Oct 1975
- [3] Ward, D.A, Exon J. "Using Rogowski coil for transient current measurements" Engineering Science and Education Journal, June 1993
- [4] P.H. Chapple, W.F.Ray, R.J.Blake, "Microprocessor Control of a Variable

- Reluctance Motor" Proc. of the IEEE, Vol.131 Pt.B, No.2, pp51~60, March 1984
- [5] J. D. Ramboz "High-current Measurement techniques, Part II; 100kA source characteristics and preliminary shunt and Rogowski coil evaluations" , NIST Rep. NISTIR 89-4040, Mar 1989
  - [6] Jun Kato; Tominaga, T.; Kuwabara, N. "Improved frequency characteristics of large Rogowski coil using lightning surges observation", Electromagnetic Compatibility, 1999, International Symposium on , 1999 , Page(s): 310 -313
  - [7] Turner, G.R.; Hofsjager, I.W. "Rogowski coils for short duration (>10 /spl mu/S) pulsed current (<10 kA) measurements", Africon, 1999 IEEE Volume: 2 , 1999 , Page(s): 759 -764 vol.2