

전류 측정감도 개선을 위한 로고우스키 코일의 설계

Design of Rogowski coil to improve of current measurement sensitivity

박정남*, 이청*, 장용무**, 강성화***, 임기조*, 나동희****
(J.N. Park*, C. Lee*, Y.M. Jang**, S.H. Kang***, K.J. Lim*, D.H. Na****)

Abstract

Rogowski coil is made having no ferromagnetic material in a core. So the coil cannot be driven into saturation. This result in that Rogowski coils may be calibrated at relatively low currents, and used with confidence at very high currents. However the lowest level of current that can be measured is limited by the sensitivity of the voltage measuring instrument and system noise. Therefore, geometrical effects were investigated in order to measure high sensitivity of low level current and the significant source of error was examined as well. In the results, the source of error was associated with coil designs, i.e. shape and uniformity of coil and a geometrical location of current source inside and outside of the Rogowski coil.

Key Words : Rogowski coil, current sensor

1. 서론

로고우스키 코일은 상호인덕턴스를 이용하여 전류를 측정하는 센서로서 1차측 전류에 의해 발생하는 자속이 코일의 양단에 전압을 유기 시킨다. 이때 코일의 양단에 유기 되는 전압은 다음의 식과 같다.

$$V_{out} = M \frac{di}{dt} \quad (1)$$
$$M = \mu_0 n A$$

여기서 μ_0 는 공기의 투자율, n은 단위 길이당 코일의 turn수 이고 A는 단면적이다.

로고우스키 코일이 갖는 가장 큰 장점은 자성체를 코어로 이용하는 기존의 CT와는 달리 공심이거나 비자성재료($\mu_r=1$)를 사용하기 때문에 자기

적으로 포화되지 않고[1, 2] 소전류에서 대전류에 이르기까지 선형적인 특성을 갖는다. 또한 대전류 측정일수록 기하학적 크기가 커지는 일반 전류 측정센서와는 달리 센서의 크기가 측정 전류의 크기에 의존하지 않으며 넓은 주파수 범위에서도 측정이 가능한 센서이다.

그러나 로고우스키 코일은 1차측 전류에 의해 발생하는 페루프의 자속을 측정하는 센서이므로 코일의 기하학적 형상이 출력에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 논문은 로고우스키 코일의 오차의 발생 원인으로써 코일의 형상과 전류원의 기하학적 형상에 따른 특성을 연구하였다.

2. 실험

2.1 로고우스키 코일의 설계

실험에 사용한 로고우스키 코일은 코일의 피치를 0.43으로 하여 직경 9mm 코어에 에나멜 코팅된 직경 0.3mm 구리선을 감아 제작하였다. 다음 그림은 로고우스키 코일의 구조를 나타낸 것이다.

* : 충북대학교 전기공학과
** : 한양대학교
*** : 충청대학 산업안전과
**** : 충청북도청 경제통상국 기업지원과

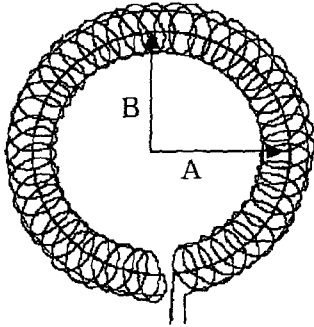


그림 1. 로고우스키 코일의 형상
Fig.1. Shape of Rogowski coil

2.2 실험 방법

로고우스키 코일의 시험은 1차측 전류의 주파수가 변할 때 코일의 출력을 측정하였고, 코일 자체의 형상이 변할 때의 출력, 1차측 전류의 위치가 코일의 중심에서 벗어날때의 영향, 1차측 전류가 코일의 중심을 지날 때 꺾여지는 위치의 영향을 연구하였다. 사용전류는 크기 50A의 전류로써 도선의 단면은 원형이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 주파수에 따른 로고우스키 코일의 특성

그림 2는 1차측 전류를 크기는 일정하게 하고 주파수만을 변화시켰을 때 로고우스키 코일의 출력을 이론값과 비교하여 나타낸 것이다. 이때 계산은 식(2)를 적용하였다.

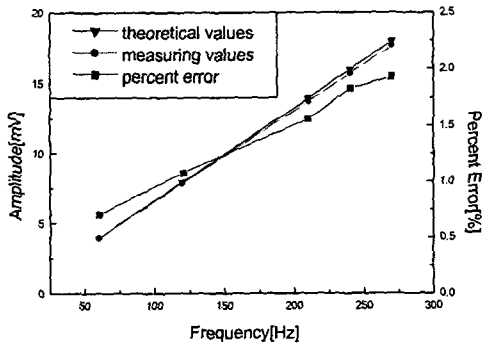


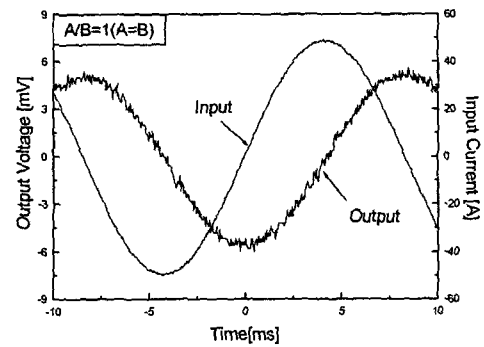
그림 2. 주파수에 따른 로고우스키 코일의 출력
Fig.2. Output characteristics as a function frequency

$$\text{Ratio of error} = \frac{|V_{th} - V_m|}{V_{th}} \times 100 \text{ [%]} \quad (2)$$

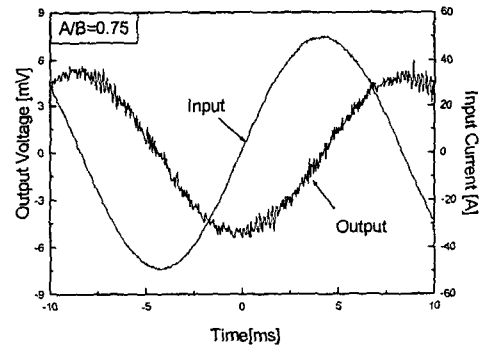
여기서 V_{th} 는 출력의 이론값, V_m 은 측정된 출력 전압이다.

그림에서 알수 있듯이 로고우스키 코일의 출력값은 주파수가 증감함에 따라 증가하지만 오차 또한 점차로 증가하는 것을 볼 수 있다.

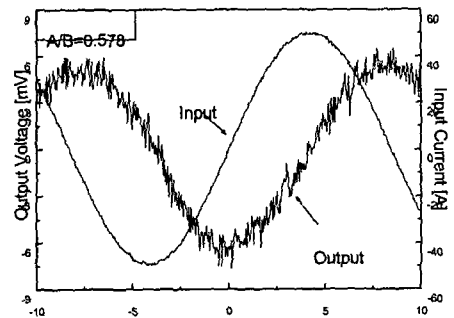
3.2 로고우스키 형상의 변화에 따른 출력 특성



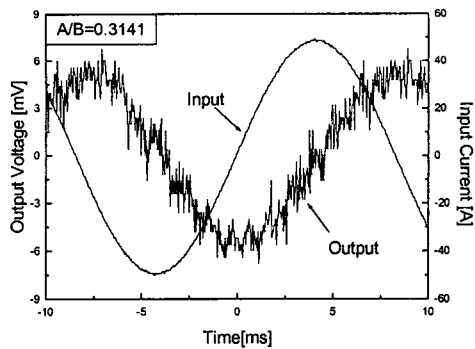
(a) A/B=1



(b) A/B=0.75



(c) A/B=0.578



(d) $A/B=0.3141$

그림 3. A/B의 변화에 따른 로고우스키 코일 출력 전압

Fig. 3. Output voltage of Rogowski coil as a variation of A/B

그림 3은 단축 A와 장축 B의 비율에 따른 로고우스키 코일의 출력 파형 변화를 보이고 있다. 출력 파형이 A/B의 값이 작아질수록 불안정해 짐을 알 수 있다. 이는 형상이 변화하게 되면 전류원의 위치가 코일의 정 중앙에서 벗어나 코일의 단면을 지나가는 자속에 변화가 일어나기 때문이다.

그림 4는 로고우스키 코일의 형상이 변화함으로써 나타나는 오차이다.

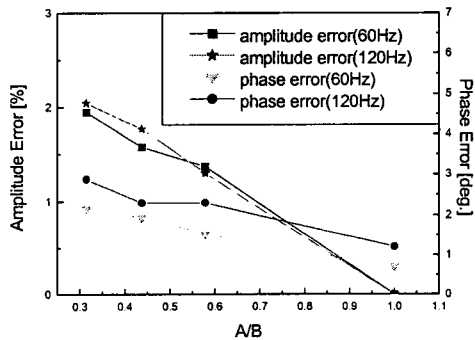


그림 4. A/B의 비율에 따른 오차

Fig. 4. Errors with the ratio of A/B

A/B의 비율이 작을수록 출력 전압의 크기와 위상차에 대한 오차의 값이 커지게 된다.

3.3 전류원의 위치에 따른 로고우스키 코일의 출력 변화

로고우스키 코일의 형상이 원형이 되었을지라도 전류원의 형상이나 위치등에 의해 로고우스키 코

일의 출력은 변화된다. 그림 5는 이러한 실험의 결과로써 코일의 중심을 0으로 하고 전류원의 위치를 5cm 씩 이동시킬 때 로고우스키 코일에서의 출력이다.

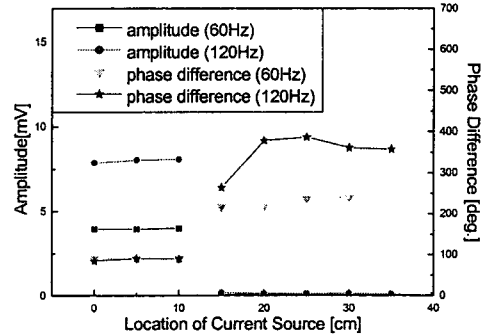


그림 5. 전류원의 위치에 따른 영향

Fig. 5. Locational effects of current sources

그림에서 보여지듯이 코일의 중심에서 벗어날때마다 출력전압의 크기와 위상차가 변화함을 볼 수 있다. 이때 중심에서의 거리 10cm 와 15cm 사이에 결과가 크게 변화하는 것은 코일의 반경이 14cm 이기 때문이다.

이것은 원형 단면의 도선으로 전류가 흐를 때 도선 주위로 발생하는 자속 또한 원형의 모양을 이루기 때문이다. 그러나 로고우스키 코일의 형상이 원형에서 벗어나거나 전류원의 위치가 변하게 되면 전류원에서 발생하는 자속의 형상과 로고우스키 코일의 형상이 일치하지 않게 되기 때문에 코일의 단면을 통과하게 되는 자속이 변화하게 되기 때문이다.

3.4 도체의 꺾임에 의한 출력 변화

3.2절과 3.3절에서의 실험은 전류원의 위치나 로고우스키 코일의 형상이 변화함에 따라 코일의 단면을 지나게 되는 자속이 변화하게 되어 발생하는 결과였다. 그러나 3.4에서의 실험은 전류원에 의해 자속 자체에 왜곡이 발생하여 코일에 영향을 미치는 경우이다.

그림 6은 이러한 경우에서의 코일의 출력을 나타낸 것으로 로고우스키 코일 중심을 지나는 전류원이 중심으로부터 10cm 씩 떨어진 곳에서 수직으로 꺾이게 될 경우 오차를 출력 전압의 크기와 위상차에 대하여 나타낸 것이다.

그림에서 보여지듯이 전류원이 꺾이게 되면

꺾이게 되는 부분이 코일에 가까울수록 출력에 영향을 미치게 됨을 알 수 있다.

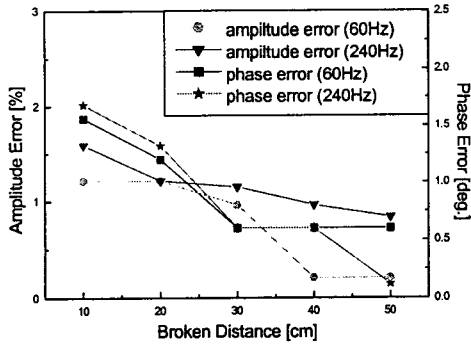


그림 6. 전류원의 꺾임에 따른 오차
Fig. 6. Errors by the bent current carrying conductor

4. 결론

주파수 변화에 대한 출력과 로고우스키 코일의 기하학적 형상 변화, 전류원의 위치와 꺾임에 따른 로고우스키 코일의 출력 변화를 연구한 결과 다음과 같이 나타났다.

- 1) 1차측 전류의 주파수가 변함에 따라 코일의 출력과 오차는 증가하였다.
- 2) 로고우스키 코일의 장축과 단축의 비율(A/B)가 작아질수록 출력 파형은 불안정해졌다.
- 4) 전류원의 위치가 코일의 중심에서 벗어나게 되면 출력 전압의 크기에 대한 오차와 위상차는 증가하였다.
- 5) 코일의 외부에 전류원이 위치할 때 출력에는 거의 영향이 없다.
- 6) 전류원의 꺾임은 출력에 큰 영향을 주었고 코일의 중심에서 가까운 곳에서 꺾일수록 그 영향은 증가하였다.

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] Turner, G.R.; Hofsajer, 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
- [7] 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
- [8] Pellinen, "Rogowski coil for measuring fast, high level pulsed current", Rev. Sci. Instrum. Vol 51. No 11, pp1535-1540, 1980