

배전반 전력측정용 전자 변류기 개발

김윤현
한밭대학교 전기공학과

Development of Electronic Transducer for Power Measurement of Switchboard

Youn-Hyun Kim
Division of Electrical Engineering, Hanbat University

요약 본 연구에서는 현재 사용중인 변류기의 한계를 극복하고 전력계통의 시스템화를 위하여 전자변류기를 개발하고자 한다. 특히 현재 무철심 잔류센서의 오차 범위는 5[%]이상이므로 정밀한 측정을 위한 1[%]이내 정밀도를 가진 전자변류기를 개발하며 차폐 및 내압 및 부분 방전 시험을 통한 코일 절연 설계 성능을 검증하고자 한다. 또한 적분기 회로 및 고조파와 직류 오프셋 제거를 위한 필터 회로 설계와 전류 측정의 선형성, 위상 오차, 저전류 측정 가능 범위 등 성능을 실험을 통해 검증하고 고정밀 변류기 개발로 사고전류의 정확한 측정에 의한 전력계통의 안정성 도모 및 정확한 전력량 측정 등 배전반 등의 전력설비에 적용할 수 있는 기반을 마련하고자 한다. 본 연구에서는 현재 전력계통에 사용중인 변류기의 한계를 극복하고 전력계통의 시스템화를 위하여 높은 정밀도를 갖는 무철심형 전자변류기(로고스키코일)를 개발하였다. 개발 결과 기존 변류기보다 상당한 수준의 크기를 감소시킬 수 있었으며 무철심 구조에 의해 포화의 문제점도 해결할 수 있었고 무엇보다 전력량의 측정의 기본인 전류의 측정정밀도를 향상시킬 수 있었다. 본 연구에서 또한 무철심 전류 센서 전용 검출 회로를 개발하여 검증하였으며 그 성능도 검증하였다. 성능의 검증을 위해 시험을 수행하였으며 시험결과 정격전류 및 정격전류의 40배 이상의 대전류에서도 매우 우수한 측정 정밀도를 갖는 전류센서가 개발되어 즉시 사업화하여 양산개발에 들어갈 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract An electronic current transformer was developed to overcome the limitations of current transformers and to systematize the power system. In particular, an electronic current transformer with precision within 1[%] was developed for precise measurements because the error range of the current iron-free core residual sensor is more than 5[%] and to verify the coil insulation design performance through shielding, internal pressure, and partial discharge tests. In addition, the design of integrator circuits and filter circuits to remove harmonics and DC offsets and the linearity, phase errors, and low-current measurable range of current measurements were verified experimentally. The development of a high-precision current is intended to lay the foundation for application to power facilities (e.g., distribution boards), such as stabilizing the power system by accurately measuring the accident current and power. As a result of the development, the size could be reduced significantly compared to the existing current transformer. Moreover, the iron core structure could solve the saturation problem, and the current measurement accuracy, which is the basis for measuring the amount of power, was improved.

Keywords : Rogowski Coil, Current Detection Circuit, Shielding, Magnet Saturation, Electronic Current Transformer

*Corresponding Author : Youn-Hyun Kim(hanbat Univ.)

email: yhyunk@hanbat.ac.kr

Received December 4, 2023

Accepted March 8, 2024

Revised January 23, 2024

Published March 31, 2024

1. 서론

반도체, 통신기기, 컴퓨터 등의 정밀 전자기기에 대한 전력부하가 증대되면서 전력기술에서도 전력 품질 관리, 배전 자동화, 전력설비의 고성능화 등이 요구되고 있다. 이와 같은 기술은 전류, 전압, 위상, 전력 등의 전기량에 대한 정확한 측정이 전제되어야 함은 주지의 사실이다. 대전류의 측정에는 분류기, 변류기, 홀센서, 광 CT(Optical Current Transformer) 등이 주로 이용되어 왔으며, 이 중에서 강자성체 코어를 이용한 변류기가 널리 사용되고 있다. 그러나 변류기의 경우 코어로 사용된 자성체의 포화현상으로 전류 측정 범위가 한정되고, 과전압의 유기 등의 문제가 있는 문제점이 있다. 특히 전자식 차단기나 릴레이의 경우 정격전류의 수십배에 달하는 단락 사고 전류까지 측정하여 사고전류에 적당한 차단시간을 결정하고 있으며, 넓은 범위의 전류를 소정의 오차범위 이내로 측정하여야 하는 데, 기존의 변류기를 이용한다면 대전류 범위를 다시 세분하여 다수개의 변류기를 사용하여야 하고, 코스트가 상승되는 단점이 있다. 또한 제품의 크기가 크므로 인해 중량이 크고, CT 2차 개방으로 인한 과전압 및 제품 소손의 위험성을 가지고 있으며 현재 전력 산업의 구조가 가격 경쟁력 및 주변의 많은 기기를 연결하여 사용하는 다기능의 기기로 개편되고 있는 상황이고 변전소 부지, 지하 설치 등의 설치장소 문제로 전력기기의 소형화, 경량화가 필요하다. 따라서 이런 필요에 의해 소정의 오차 범위이내에서 보다 광범위한 측정 범위를 갖는 전류 센서로서 무철심형 전류 센서 즉, 로고스키 코일이 최근 주목받고 있다. 로고스키 코일은 자속밀도를 측정하기 위한 센서로 제안되어 주로 사용되어 오다가 광범위의 대전류 측정용 센서로 새롭게 주목 받고 있다. 로고스키 코일에 의한 전류 측정은 암페어의 주회법칙에 따라 피측정 전류에 의해 발생된 자속의 코일에의 쇄교량 변화로 유도되는 기전력을 측정하여 전류를 간접 측정하는 방식이다. 이러한 로고스키 코일이 갖는 가장 큰 장점은 자성체를 코어로 이용하는 기존의 변류기와는 달리 공심이거나 비자성재료를 사용하기 때문에 자기적으로 포화되지 않으며 넓은 전류 영역까지 측정전류와 유기전압의 관계가 선형적이다. 또한 변류기와 달리 사용중에 2차측 개방에 따른 과전압의 유기 문제도 없으며, 출력이 전압의 형태이므로 다른 디지털 보호 릴레이를 구동 시킬 수도 있다. 특히 구조가 간단하여 생산 코스트가 저렴한 장점이 있어서 대전류 방전장치, 고온 플라스마 발생장치 및 고속 스위칭 전력전자회로 등에서 전류

측정센서로서 많이 이용되고 있다. 그러나 변류기에 비하여 심하지는 않지만 주파수에 따른 임피던스 특성에 따라 측정전류의 주파수가 제한이 되며, 특히 저전류 측정시 코일에 유기되는 전압이 적기 때문에 특별한 구조 설계가 필요하다[1].

로고스키 코일의 기존의 연구는 선진 외국사에서는 로고스키 코일형 전류센서를 활용한 제품을 출시하기 시작하고 국내 일부 대학에서 펄스 전류 등을 측정하기 위한 로고스키 코일을 개발하거나 기초적인 특성 연구가 수행된바 있으나 대부분의 연구를 위한 로고스키 코일은 방전이나 고전압 실험과 같은 실험용으로 고압용 전력기기의 계기용이나 보호용으로 적용할 수 있는 특성을 갖는 상용 목적의 전자식 전류 센서의 개발 연구가 수행된 바는 거의 없고 특히 고압에 적합한 노이즈등의 차폐 성능 및 절연의 성능 확보에 대해서 초보적 수준이다[2-4].

본 연구에서는 현재 사용중인 변류기의 한계를 극복하고 전력계통의 시스템화를 위하여 전자변류기(로고스키 코일)를 개발하고자한다. 특히 현재 무철심 잔류센서의 오차 범위는 5%이상이므로 정밀한 측정을 위한 1%이내 정밀도를 가진 전자변류기를 개발하며 차폐 및 내압 및 부분 방전 시험을 통한 코일 절연 설계 성능을 검증하고자 한다. 또한 적분기 회로 및 고조파와 지류 오프셋 제거를 위한 필터 회로 설계와 전류 측정의 선형성, 위상 오차, 저전류 측정 가능 범위 등 성능을 실험을 통해 검증하고 고정밀 변류기 개발로 사고전류의 정확한 측정에 의한 전력계통의 안정성 도모 및 정확한 전력량 측정 등 배전반 등의 전력설비에 적용할 수 있는 기반을 마련하고자 한다.

2. 본론

2.1 로고스키 코일 원리

로고스키 코일은 시간에 따라 변화하는 교류 또는 과도상태의 전류를 측정하는 센서이다. 로고스키 코일에서 유기되는 전압은 코일 창을 관통하는 전류선과 코일간의 상호인덕턴스와 전류의 변화율에 의해 Eq. (1) 과 같이 결정된다[5,6].

$$e = M \frac{di(t)}{dt} \quad (1)$$

여기서 e : 코일유기전압 [V],

M 은 상호인덕턴스로 Eq. (2)로 나타낸다.

$$M = \mu_0 n A \quad (2)$$

여기서 μ_0 : 공기의 투자율, n : 턴 수, A : 코일의 단면적

측정하고자 하는 전류는 Eq. (1)에서 제시된 로고스키 코일에서 유기된 전압을 적분하면 Eq. (3)와 같이 구할 수 있다.

$$i(t) = \frac{1}{M} \int e(t) dt \quad (3)$$

도체에 흐르는 전류가 교류일 때 코일에 유기되는 전압은 자속의 변화율과 같다.

2.2 무철심 전류센서(로고스키코일)의 설계와 제작

2.2.1 1차 P/T 설계

2.1절의 로고스키 코일 이론식을 사용하여 측정감도를 얻기 위한 구조를 다음의 단계로 설계하였으며 Fig. 1에 설계 수순을 나타내었다.

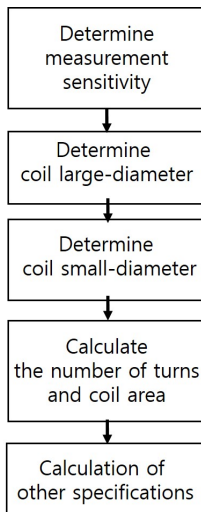


Fig. 1. Design Procedure for Rogowski coil

먼저 측정감도(출력전압/피측정전류 mV/A)를 최대 2000[A]에 대해 약 400[mV] 정도 발생하도록 전류의 측정범위와 적분기 및 증폭기의 이득, 선형성, 노이즈 등을 고려하여 약 0.2[mV/A] 정도의 적절한 값으로 결정하였으며 2000[A]의 전류 검출 도체가 관통될 수 있도록 1차 PT는 충분히 대경을 150[mm] 정도로 선정하였다. 대경이 결정되면 로고스키 코일의 원주가 결정되므로 0.1mm에서 0.2mm 직경의 측정 코일이 약

2000~3000 턴 정도 1층으로 감을 수 있는 여력이 있다. 또한 상기 Eq. (2)의 상호인덕턴스는 측정감도에 해당하며 측정감도 0.2에 턴수 2000~3000을 고려하면 로고스키 코일 단면적 A는 약 80[mm²]로 계산되어 로고스키 코일 직경, 즉 소경을 9[mm] 정도로 산출할 수 있었다.

위의 설계치에 따른 특성을 확인하기 위하여 폴리에틸렌 절연 실드케이블(PE절연 반경 4mm)을 시스와 실드부분을 제거한 후, 에나멜선(직경 0.14, 0.18mm)으로 권선기에 의해서 권선 작업하였으며, 케이블의 도체는 리턴 코일로 사용하였다. 적절한 방법으로 실드를 하고 절연테이프로 절연처리를 하였다.

특성실험에 사용한 로고스키 코일의 권폭을 0.23, 0.19로 하여 직경 9mm 코어에 에나멜 코팅된 직경 0.14, 0.18mm 구리선을 턴수 2500, 3000으로 나누어 권선층수는 1로 하여 제작 하였다. 다음 Fig. 2와 Fig. 3은 시험에 사용된 코일의 외형이며 Fig. 2는 차폐하지 않은 상태, Fig. 3은 차폐한 상태를 보여주고 있다. 이때 시료는 차폐와 차폐하지 않은 시료 각각 3종씩 제작하였으며 Table 1은 설계한 3종의 로고스키 코일의 사양을 나타내었다.



Fig. 2. Unshielded Rogowski coil samples used in the test

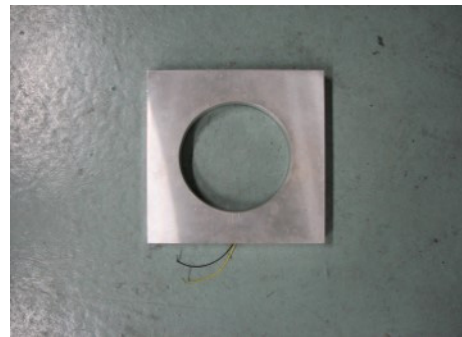


Fig. 3. Shielded Rogowski coil samples used in the test

Table 1. Rogowski Coil Specifications

Samples	#1	#2	#3
Coil Diameter	0.14	0.14	0.18
Turn	2500	3000	2500
Winding Width	0.23	0.19	0.239
number of winding floors	1	1	1

2.2.2 1차 P/T의 평가 실험

본 평가시험의 측정 장비는 전류 3000A 허부하 전류 발생기와 오실로 스코프를 사용하였다.

IEC 60044-8에서는 정격전류에서 코일의 출력을 0.15V로 규정하고 있으며 최소측정전류인 5%전류에서의 출력값은 7mV/V정도의 대단히 미약한 전압이 된다. 적절한 차폐방법을 찾기 위해 차폐방법에 따른 출력 신호의 특성을 비교 분석하기 위해 우선 차폐하지 않은 로고스키 코일의 출력 신호를 측정 결과 Fig. 4와 같이 나타났다. 이때 x축은 시간축이며 y축은 한칸에 20[mV] 스케일로 나타내었다.

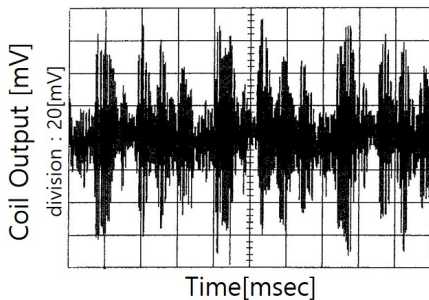


Fig. 4. Output signal from Rogowski coil without shield

다음으로 알루미늄 case 로 차폐한 로고스키 코일의 출력신호를 측정한 결과 Fig. 5와 같이 결과를 얻었다. 이때 스케일은 Fig. 4와 마찬가지로 20[mV] 스케일로 나타내었다. 결과로부터 Fig. 4의 차폐를 하지 않은 경우 정현파 파형의 형태가 구분되지 않을 정도로 노이즈가 포함되어 있고 알루미늄 case로 차폐한 결과는 노이즈가 현저히 감소하여 어느 정도 정현파 파형의 형태를 파악할 수 있어 차폐 효과를 확인 할 수 있었다.

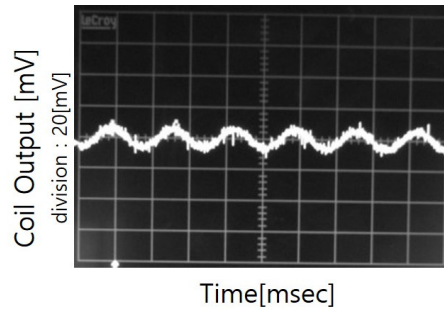


Fig. 5. Output signal from Rogowski coil with shield

알루미늄 case를 사용한 차폐 상태에서 전류 10A, 200A, 500A, 1000A, 2000A 을 각각 시료 3종 3회씩 실시결과 다음과 같이 Table 2-6에 제시하였다. Table 에서 k는 평균값 대비 최대편차 비율을 나타내었고 그 결과 측정 전류가 클수록 측정오차의 편차가 전반적으로 줄어드는 것을 확인하였으나 10A에서는 편차가 크게 나타나 저전류 측정의 정밀도에 다소 문제가 있음을 확인하였다. 또한 Fig. 6은 전류에 대한 측정값의 선형성을 나타내었다. 전반적으로 측정 출력값이 전류의 크기에 비례적으로 증가하는 시험 결과를 도출하여 1차 P/T의 주 검증 요소인 로고스키 코일의 선형성을 만족함을 확인하였다. 다만 100A 미만의 저전류에 대해서는 아직 선형성을 보장 못하여 계통의 정격 전류 이상의 측정에는 지장이 없지만 저전류 측정이 필요시에는 저전류 검출용 별도의 전류센서가 필요하다고 사료된다.

Table 2. Measurement results at 10A.

sample	Measurements(mV)			
	1st	2nd	3rd	k(%)
#1	17.0	12.17	15.58	32.38
#2	17.28	17.79	18.08	4.52
#3	16.75	13.09	14.46	24.79

Table 3. Measurement results at 200A

sample	Measurements(mV)			
	1st	2nd	3rd	k(%)
#1	52.33	51.22	51.10	2.15
#2	59.98	61.73	61.13	2.87
#3	53.74	57.52	59.37	9.90

Table 4. Measurement results at 500A

sample	Measurements(mV)			
	1st	2nd	3rd	k(%)
#1	117.39	115.95	114.38	2.60
#2	138.44	136.7	135.19	2.38
#3	118.29	121.98	117.81	3.49

Table 5. Measurement results at 1000A

sample	Measurements(mV)			
	1st	2nd	3rd	k(%)
#1	221.9	221.86	220.47	0.65
#2	261.29	265.52	261.26	0.01
#3	228.01	230.82	227.9	0.05

Table 6. Measurement results at 2000A

sample	Measurements(mV)			
	1st	2nd	3rd	k(%)
#1	437.45	431.76	442.68	2.50
#2	514.95	526.59	509.47	1.06
#3	451.82	446.31	446.29	1.23

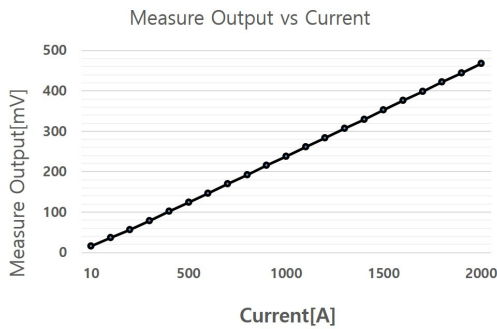


Fig. 6. Linearity of Rogowski Coil

2.2.3 2차 P/T의 평가 실험

상기 1차 P/T에서는 측정의 정밀도와 선형성에 주안점을 두고 개발 및 시험을 수행하였으며 1차 P/T 시험 결과를 기초로 하여 2차 시료를 다시 제작하였다. 2차 P/T 개발의 주요 방향은 양산성 향상을 위한 사이즈의 콤팩트화 및 외부 시험기관을 통한 정밀성의 검증을 목표로 하여 수행하였다. 1차 시험 결과 전체적으로 측정의 정밀도 및 선형성을 만족하면서 로고스키 코일의 사이즈를 콤팩트하게 가져갈 수 있다고 판단되어 로고스키 코일의 원주에 해당하는 즉 코일의 대경을 65[mm]로 축

소하고 측정 감도를 0.075로 낮추었다. 또한 차폐가 필요하며 차폐는 사이즈 및 정밀도를 고려하여 각형보다 원형으로 제작하였으며 IEC 60044-8 의 규격에 따라 시료 2000A, 출력 150[mV] 두 가지 방식으로 제작하였다. 첫번째는 2000A, 출력 150[mV]의 하나의 원형 보빈에 로고스키 코일을 하나의 튜브형태로 제작하여 원형으로 고정하는 1층 권선방식으로 제작하고 권선은 직경 0.16[mm], 1,350 턴으로 하였다. 두 번째 시료는 2000A, 출력 150[mV]의 하나의 원형 보빈에 로고스키 코일을 6개의 튜브로 연결하여 보빈에 원형으로 고정하는 방식, 즉 6층으로 권선되도록 하였으며 권선은 각 237×6 턴이다. 그 설계도면을 Fig. 7에 나타내었다.

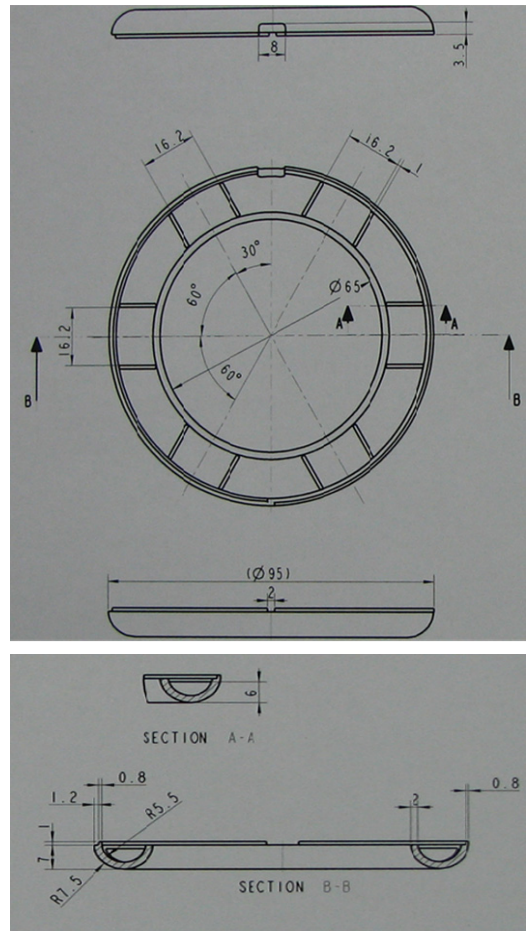


Fig. 7. Design Drawing of Rogowski Coil

또한 제작한 첫 번째, 두 번째 시료의 제작한 사진을 Fig. 8에 나타내었다. 시료 2000A, 150[mV]의 두 가지 방식에 대한 설계, 제작한 시료에 대해 각각 오실로스코

프 측정파형은 Fig. 9과 Fig. 10에 나타내었으며 측정 시험을 위해 측정전류를 발생시키기 위한 전류발생기와 전류발생기 출력에 측정 시료를 설치하여 연결한 모습은 Fig. 11과 같다. 이때 x축은 시간축이며 y축은 mV 단위의 전압 출력으로 측정전류에 따라 스케일을 다르게 세팅하여 나타내었다. Fig. 9와 Fig. 10에서 출력전압 값은 확인하여 전류에 따른 출력값의 선형성을 파악하였으며 최종적인 정밀도와 선형성의 검증 시험은 외부 기관의 시험을 통해 검증하여 Table 7과 8에 제시하였다. 다만 Fig. 9와 Fig. 10에서 정현파 출력이 아닌 고조파 성분이 포함되어 나와 정밀도에 오차를 수반할 요소로 작용되며 저전류에서 출력 대비 노이즈 성분의 비율이 높게 나타남을 알 수 있었다. 따라서 2.3절의 고조파와 노이즈를 제거하는 증폭기 및 필터회로를 첨가한 검출회로를 통해 정밀도를 향상하고자 한다.

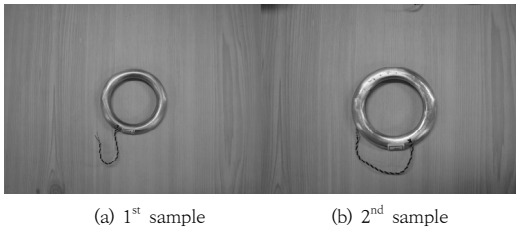


Fig. 8 samples photograph

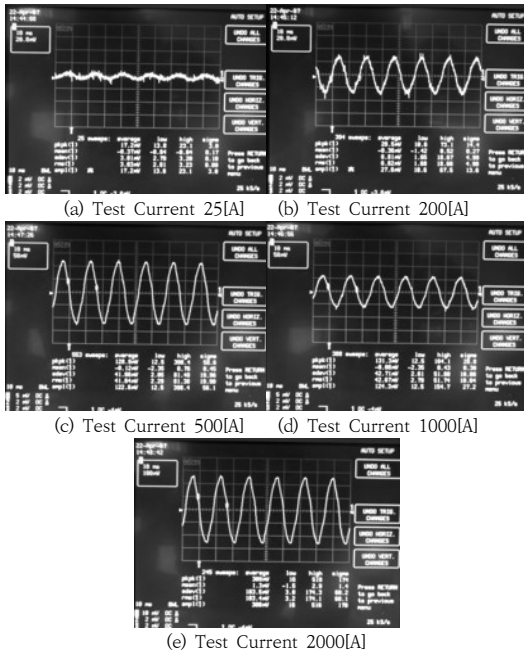


Fig. 9. Measurement waveform of sample 1

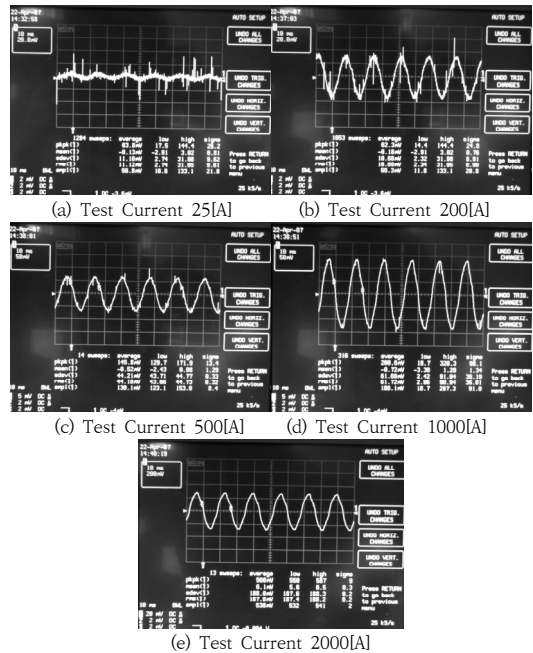


Fig. 10. Measurement waveform of sample 2

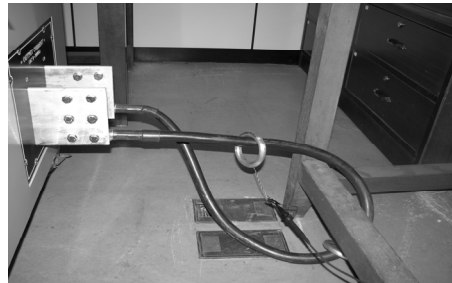


Fig. 11. Measurement samples

Table 7과 8은 2차 P/T의 첫번째와 두 번째 시료의 외부시험기관에서 측정한 실험 리포트를 정리한 표이다. 여기서 100[A]에서 800[A]까지 측정하였으며 전류의 오차율을 제시하였다. 측정 결과 전류 오차는 최대 0.4[%]를 넘지 않는 정밀도를 보여주었다. 또한 시료 1의 오차를 평균은 0.3 정도이며 시료 2의 평균 오차는 0.24로 시료 2의 다층으로 권선한 경우가 정밀도면에서 조금 더 적은 오차를 나타내고 있음을 시험을 통해서 알 수 있었다.

Table 7. Test report of sample 1

Test No	Error rate(%)			
	100A	400A	600A	800A
1	-0.38	-0.45	-0.42	-0.40
2	-0.28	-0.28	-0.27	-0.22
3	-0.38	-0.39	-0.36	-0.31
4	+0.14	+0.12	+0.15	+0.19

Table 8. Test report of sample 2

Test No	Error rate(%)			
	100A	400A	600A	800A
1	+0.02	+0.05	+0.09	+0.14
2	-0.38	-0.44	-0.43	-0.39
3	+0.02	+0.05	+0.12	+0.13
4	-0.38	-0.41	-0.40	-0.38

2.3 로그스키코일의 검출회로 설계와 제작

Fig. 12는 무철심 전류센서(로그스키코일)의 검출회로를 설계하여 보여주고 있다. 그림에서 a)는 전류센서의 신호가 작으므로 신호를 증폭하는 증폭기 회로이고, b)의 HPF 회로부는 신호의 DC offset 성분을 제거하기 위한 고주파대역 필터이며 c)의 LPF 회로부는 신호에서 고주파 성분의 노이즈를 제거하기 위한 저주파대역 필터이다. 그림의 d)는 센서 신호가 전류의 미분형태로 유기되므로 이 신호를 다시 적분하는 적분기 회로이다. 각 부분의 구체적 구성 및 설계값은 Fig. 13에 제시하였다. 각각의 회로 정수들은 실험에 의해 조절하였다.

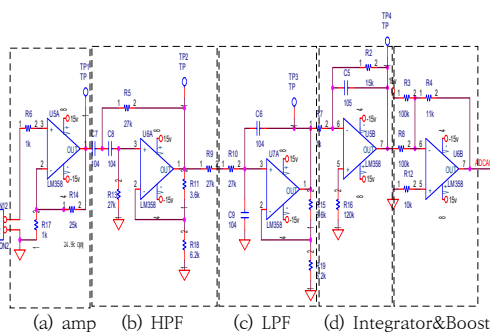


Fig. 12. Detection circuit of Logoski coil

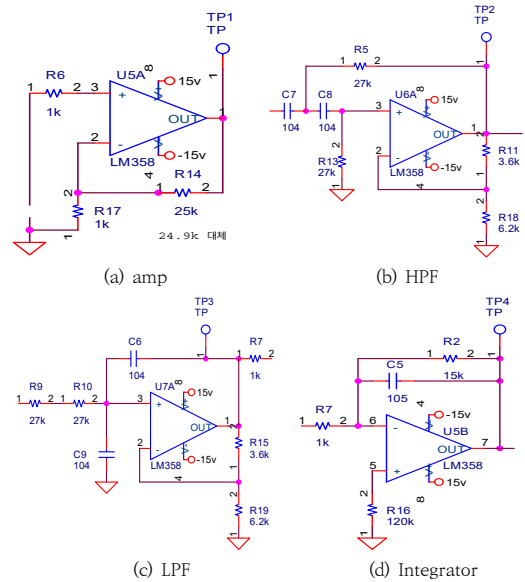
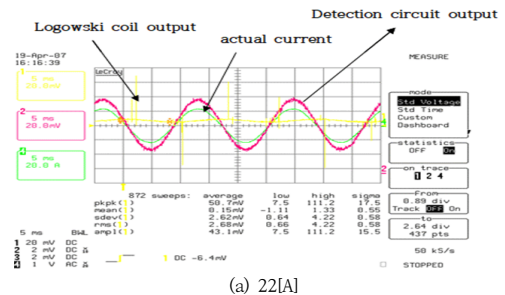


Fig. 13. Detailed configuration of detection circuit

Fig. 14는 각각 전류 22[A], 60[A], 200[A], 500[A], 1000[A], 2000[A]에 대해 검출회로로 검출한 전류 파형을 나타낸다. 이때 회로 입력파형인 로그스키 코일 출력 파형과 검출회로의 검증을 위해 측정장비의 CT-Prove를 이용한 측정 전류 파형과 비교하였다. 그림에서 로그스키 코일 출력 파형은 노이즈와 고조파 성분이 포함되어 변류기 출력으로 사용하기에 적절하지 않은 형태이나 검출회로를 거쳐 순수한 정현파 성분으로 정형화하였으며 코일 출력은 원리상 실제 전류와 90도 위상 차이를 나타내나 적분기 회로를 통해 실제 전류와도 위상이 같은 파형을 검출할 수 있었다. Fig. 14의 검출회로 측정 시험에서 100A이하 저전류는 실제 전류와의 크기의 오차가 발생하나 200A 부터는 실제 전류와 측정 전류와 완전히 일치하여 겹쳐서 나와 하나의 파형처럼 보이는 것을 확인할 수 있었다. 또한 본 연구에서 검증 실험 및 향후 양산을 고려하여 설계, 제작한 검출회로가 첨부된 보드의 사진을 Fig. 15에 나타내었다.



(a) 22[A]

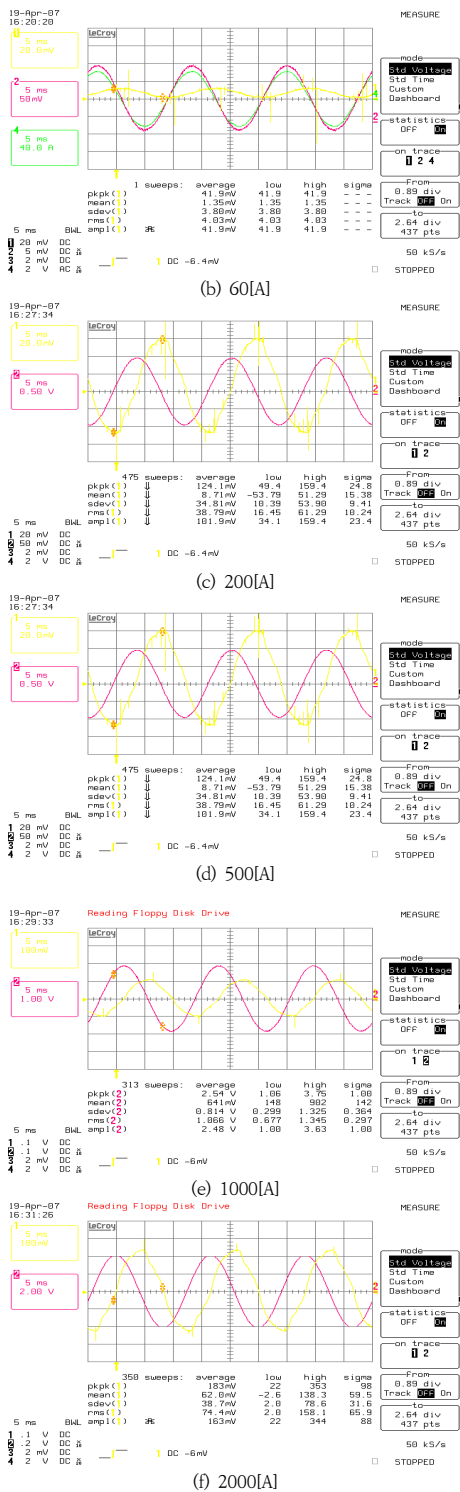


Fig. 14. Measurement current waveform by detection circuit

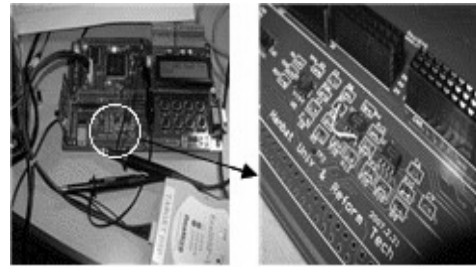


Fig. 15. Demo B/D with detection circuit

3. 결론

본 연구에서는 현재 전력계통에 사용중인 변류기의 한계를 극복하고 전력계통의 시스템화를 위하여 높은 정밀도를 갖는 무철심형 전자변류기(로고스키코일)를 개발하였다. 본 연구에서는 개발 방법에 대해서 제시하였으며 제안한 방법에 의해 개발된 결과물이 적용에 문제가 없음을 시험을 통해 증명하였다. 개발 결과 기존 변류기보다 상당한 수준의 크기를 감소시킬 수 있었으며 무철심 구조에 의해 포화의 문제점도 해결할 수 있었고 무엇보다 전력량의 측정의 기본인 전류의 측정정밀도를 향상시킬 수 있었다. 또한 전류센서의 중요 성능인 선형성에도 로고스키 코일의 적용에 문제가 없음을 시험을 통해 검증할 수 있었으며 2차 P/T에 의해 양산에 근접한 사이즈의 콤팩트화도 달성할 수 있었다.

본 연구에서 또한 무철심 전류 센서 전용 검출 회로를 개발하여 검증하였으며 그 성능도 검증하였다. 성능의 검증을 위해 시험을 수행하였으며 시험결과 정격전류 및 정격전류의 40배 이상의 대전류에서도 매우 우수한 측정정밀도를 갖는 전류센서가 개발되어 즉시 사업화하여 양산개발에 들어갈 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] Y. H. Kim, J. N. Kim, "Development of a New Mixed Rogowski Coil with Improved Low Current Measurement Precision", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society Vol. 23, No. 3 pp. 540-548, Mar. 2022
DOI: <https://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.3.540>
- [2] Ray W.F, R.M. Davis, "Wide bandwidth Rogowski Current Transducers", EPE Journal Vol 3 No. 1 pp 51-59, Sept. 2015
DOI: <https://doi.org/10.1080/09398368.1993.11463312>

- [3] Ray W.F. and Davis R.M, "Developments in Rogowski Currents Tranducers", IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, EPE, pp 3308-3312, 1097
- [4] Alessandro Mingotti, Lorenzo Peretto, S and Roberto Tinarelli, "Rogowski Coils Suit Relay Protection and Measurement", IEEE Computer Applications in Power, Vol 10, No 3, pp. 47-52, Jul. 1997
DOI: <http://doi.org/10.1109/67.595293>
- [5] M. H. Samimi, A. Mahari, M. A. Farahnakian, and H. Mohseni, "The Rogowski Coil Principles and Applications: A Review," IEEE Sensors Journal, vol. 15, no. 2, pp. 651-658, Feb. 2015.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2014.2362940>
- [6] J.-H. Lee, H.-R. Lim, H.-K. Shin, S.-C. Cho, and J.-O. Kim, "Simulation and Development of Rogowski Coil for Lightning Current Measurement," Journal of Electrical Engineering & Technology, vol. 14, no. 5, pp. 1831-1839, Jun. 2019.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s42835-019-00200-2>

김 윤 현(Youn-Hyun Kim)

[정회원]



- 1989년 2월 : 한양대학교 대학원
전기공학과 (공학석사)
- 2002년 2월 : 한양대학교 대학원
전기공학과 (공학박사)
- 1989년 3월 ~ 1999년 2월 : LG
산전연구소 책임연구원
- 2003년 4월 ~ 현재 : 한밭대학교
전기공학과 교수

<관심분야>

전기기기, 전력전자