Flexible Rogowski 코일을 이용한 클램프형 전류 센서의 개발

장용무, 김성일
EMD

Development of Clamp Current Meter using a Flexible Rogowski Coil

Yong-Moo Chang, Seong-Il Kim
EMD

Abstract

A Rogowski coil can measure alternating currents from a few amps to over 1 million amps in a frequency range from less than 0.1 Hz to about 1Mhz. A Rogowski coil provides an induced output voltage which is proportional to the rate of change of the primary current enclosed by the flexible or the rigid coil-loop. Therefore, it is necessary to integrate the output voltage in order to produce a voltage proportional to the current. Also. it can reproduce the current waveform on an oscilloscope or any type of data acquisition device.

This paper describes the practical design of the combination of a Rogowski coil and an integrator which provides a versatile current measuring system to accommodate a wide range of frequencies, current levels and conductor sizes.

Key Words : Rogowski coil, Integrator, Current meter, High current measuring

1. 서 론

최근에 전력설비를 비롯하여 산업현장에서 수 A에서 kA이상의 과도전류까지의 광범위한 전류 측정의 경우가 빈번하다. 전류를 측정할 수 있는 방법으로는 CT(current transformer), 홀센서, shunt 저항, 로고스키 코일 등 여러 가지 방법이 있으나, CT 권선코어의 자속포화로 인한 측정전류의 제한이나 2차측의 개방으로 인한 사고, 홀센서의 보조전원 필요성, shunt의 측정범위 등의 여러 가지 문제점이 존재하므로 이를 해결할 수 있는 방법은 로고스키 코일을 이용하는 것이다.[1]-[4] 로고스키 코일은 자성체 코어를 사용하지 않으므로 정상전류 및 사고전류범위까지의 측정 선형성이 매우 우수할 뿐 아니라 자속 포화를 걱정할 필요가 없다. 또한 구조적으로 단순하여 코일형태를 다양하고 손쉽게 변형시킬 수 있고 경량화가 용이하며, 최근에는 IEC60044-8의 ECT 규격까지 제정되어 전력기기 및 선업현장용의 전류측정으로 로고스키 코일이 최적으로 평가되어 선진외국에서 상용 개발이 활발하다.

본 연구에서는 이러한 개발 경향에 앞장서기 위하여 다용도의 상용화 로고스키 코일을 설계 제작하여 용도에 따른 특성시험을 행하였다.

2. Rogowski 코일 설계

로고스키 코일은 1912년에 제안된[2] 방법으로, 그림 1에서 보는 바와 같이, 일정한 단면을 갖는 원형의 비자성체 코어(일명 air-core)에 에나멜선이 균일한 밀도로 권선된 형태로서, 피측정 전류 도체를 관통시켜 측정한다. 관통된 도체의 전류 I가 시간적으로 변화될 때 로고스키 코일에 유기되는 전압신호 V는 식(1)과 같이 계산된다.

$$V = \mu_0 NA \frac{dI}{dt} = M \frac{dI}{dt} \qquad (1)$$

여기서, μ_0는 진공의 투자율이고, N은 권선밀도 [turns/m], A는 코어의 단면적 [m^2], M은 로고스키 코일의 측정감도 [Vs/A]이다. 만약에 측정대상 전류가 상용 AC 전류 $I = \sqrt{2} I_{RMS} \sin(\omega t + \varphi)$이면, 식 (1)은 식(2)와 같이 정리된다.

$$V = \sqrt{2}\,\omega M I_{RMS} \cos(\omega t + \phi) \qquad (2)$$

로고스키 코일의 출력신호는 식(1)과 같이 측정대상 전류 I의 미분형태로 유도되므로 I와 동일한 파형의 신호를 얻기 위하여 적분기를 사용해야 한다. 로고스키 코일과 적분기로 구성되는 전류 측정기를 설계할 때는 최적의 특성을 얻기 위하여 전류대 전압비, 최대 측정전류크기, 주파수 범위, 위상 및 측정오차, 관통되는 전류도체의 크기, 도체의 인가전압 등을 고려해야 한다. 또한 로고스키 코일의 출력신호는 관통된 전류도체의 위치에 무관하고, 관통되지 않은 주변 도체의 전류에 의한 자계 및 외부 잡음에 영향을 받지 않도록 설계·제작되어야 한다. 이상과 같은 조건을 만족시킬수 있도록 본 연구에서 클램프형 유연(flexible) EMD-로고스키 코일을 그림 2와 같이 제작하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

그림 3은 3종류의 상용 로고스키 코일(시료 CR, CP, CA)과 EMD-로고스키 코일에 대하여 시험전류를 AC 2000 [A]까지 변화시키면서 측정한 결과를 나타냈다. EMD-로고스키 코일은 측정감도를 250 [mV/kA_{rms}]로 제작하여 상용제품보다 십수배 이상이 되도록 하여 신호증폭 없이도 오실로스코프나 DMM 등으로 측정이 용이하도록 하였다. 그림 3의 상용시료의 신호크기는 EMD-코일의 측정감도 크기와 비슷하도록 규격화시킨 결과로 측정결과의 선형성이 우수한 것을 알 수 있다.

EMD-코일에서 채결부 양끝단의 권선연결방법을 달리한 두종류에 대하여 각각 2개씩의 시료(시료#1, 2 및 A, B)에 대한 실험결과를 그림 4에 나타내었다. 그림 4-(a),(b)는 0.2%오차의 전류원(Yokogawa Type 2558)를 사용한 측정결과로서 시험전류를 기준으로 할 때 시료 #1, #2가 좀 더 정확한 것을 알 수 있었다. 이는 허부하 전류원에 대한 그림 4-(c)의 결과와도 일치되었다.

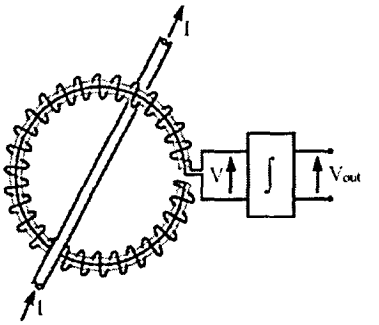


그림 1. Basic Rogowski coil with integrator

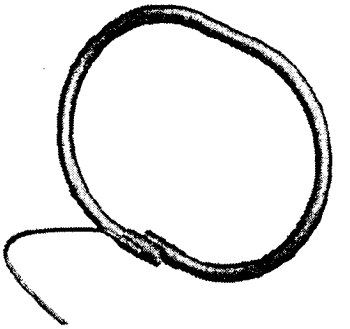


그림 2. Designed flexible Rogowski coil

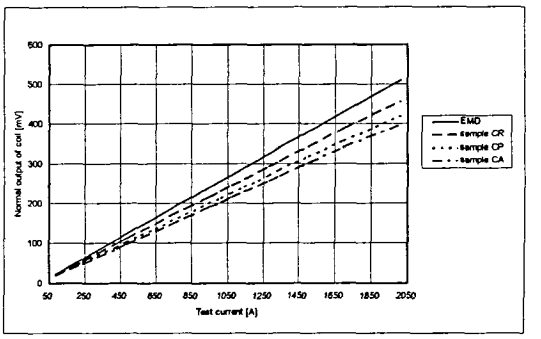
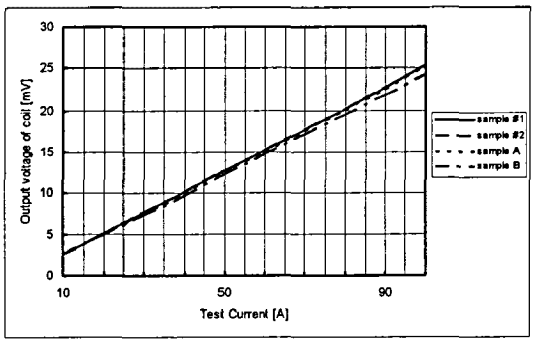
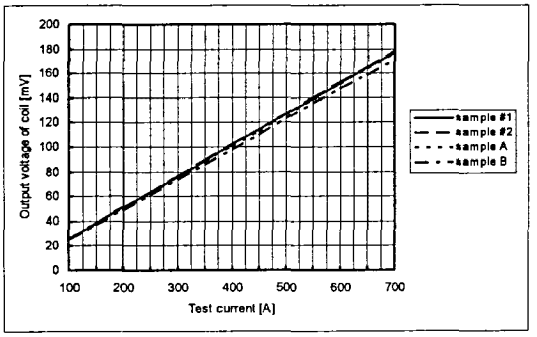


그림 3. Designed coil output and normalized commercial coils'

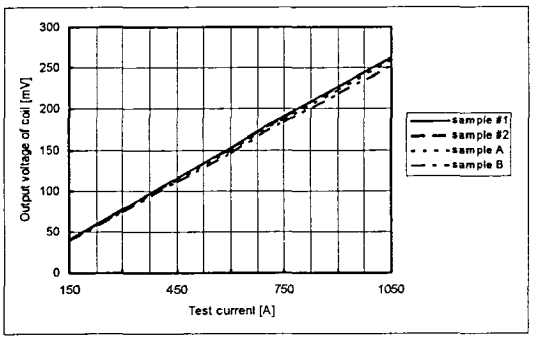
그림 5는 전류도체의 위치에 따른 출력특성으로 (a)는 전류방향이 반대인 도체간의 거리를 120~240 [mm]까지 변화시킬 때의 결과로서 주변도체의 영향을 받지 않고 관통도체의 전류에 대한 신호만 출력된다는 것을 알 수 있다. 그림 5-(b)는 코일을 관통하는 전류 도체의 위치를 중심에서부터 60 [mm]까지 변화시킨 것으로 코일출력에는 영향이 없었다.



(a) Test with Voltage Current Standard

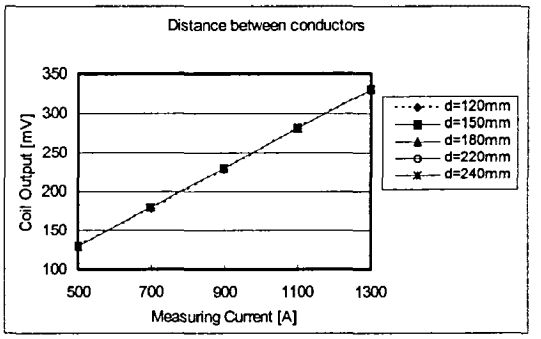


(b) Test with Voltage Current Standard

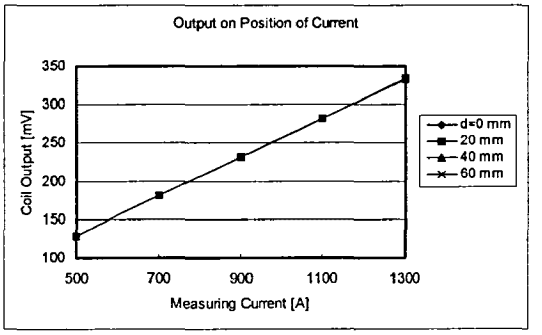


(c) Test with 2500 A Current Source

그림 4. Output characteristics of a two kinds of designed coil



(a) d is a distance between current conductors



(b) d is a distance from center of coil.

그림 5. Position sensitivity

그림 6은 단락전류 측정용으로 제작한 4개의 고정형(rigid) 로고스키 코일 시료에 대한 70[kA_{peak}] 단락 전류 측정결과를 나타내었다. 기준 센서는 shunt 저항으로 하였으며 그림에서 보는바와 같이 shunt 출력과 크기 및 위상이 잘 일치됨을 알 수 있었다.

그림 7은 단락 전류의 크기를 변화시켰을 때의 시험결과로 기준인 shunt 출력과 잘 일치하였으며 이들 결과를 표 1에 정리한 것을 보면 본 연구에서 제작한 로고스키 코일의 오차특성이 1% 이내로 정밀급 계기용 센서로서 만족한 결과를 얻었다.

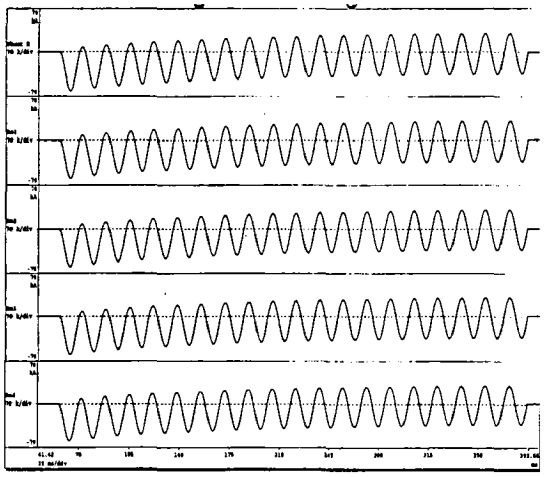
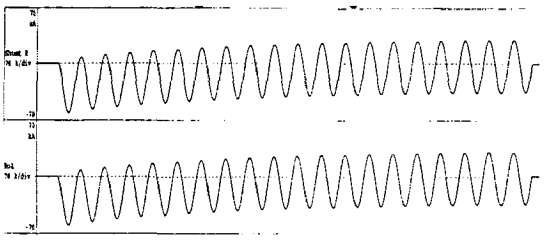
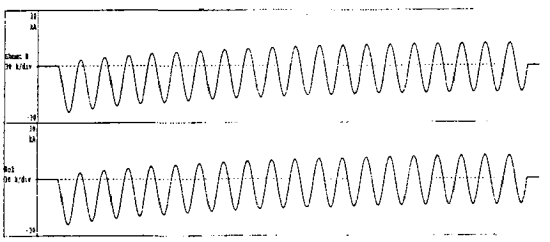


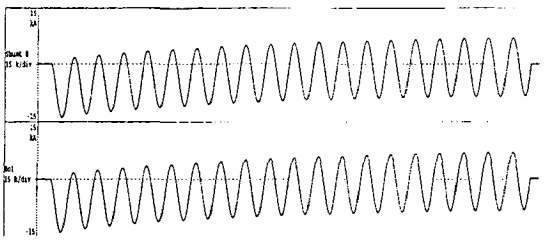
그림 6. Waveform of short-circuited current test (Ro1-Ro4 : sample #1-#4, shunt : reference, test current : 70kA$_{peak}$)



(a)70kA$_{peak}$



(b)25kA$_{peak}$



(c)15kA$_{preak}$

그림 7. Waveform of short-circuited current test

표 1. Test values and error

# of test	Test Current		Rogowski Current Meter			
	Peak[kA]	RMS[kA]	Peak[kA]	error of peak[%]	RMS[kA]	error of RMS[%]
5197	61.230	23.260	60.590	-1.05	23.030	-0.99
5198	24.670	9.276	24.480	-0.77	9.203	-0.79
5205	13.970	5.475	13.860	-0.79	5.432	-0.79
5210	7.285	2.832	7.211	-1.02	2.801	-1.09

4. 결 론

본 연구에서는 AC 10[A]에서 수10[kA]이상의 단락전류까지 측정할 수 있는 로고스키 코일을 설계 제작하여 1% 오차범위내의 전류측정기를 개발하였다.

감사의 글

단락시험에 도움을 준 PT&T에 감사를 드립니다.

참고 문헌

[1] A. M. Luciano and M. Savastano, " wide Band Transformer based on a Split-Conductor current Sensor and a Rogowski coil for High Current Measurement", IEEE Trans. Instr. Meas., vol.42, pp454-457, 1996

[2] W. Rogowski and W. Steinhaus, "Die messung der magnetishe spannung", Arch Electrotech, vol.1, pp.141- 150, 1912

[3] John D. Ramboz, "Machineable Rogowski Coil, Design and Calibration", IEEE Trans. Instr. Meas., vol.42, pp329-334, 1996

[4] W. F. Ray, "Wide bandwidth Rogowski Current Transducers", EPE Journal, vol.3, p.51 1993