

단락전류 측정용 Rogowski coil 개발

이용신, 박지훈, 함길호, 최원석, 장용무*
 LGIS전 전력시험기술센터, *한양대학교 전기공학과

A study on Rogowski coil for measuring Short-circuit currents

Yong-Shin Lee, Ji-Hoon Park, Gil-Ho Ham, Won-Suk Choi, Yong-Moo Chang*
 LGIS Power Testing & Technology Institute, Dept. of Electrical Eng. Hanyang Univ.*

Abstract - This paper describes the theory and practical design of Rogowski coil and active integrator. The coils and integrators have the ratings as follows. 1) current ratings between 20kArms and 200kArms 2) current duration 3 seconds 3) time constant of primary circuit 100ms 4) inner diameter of coil is suitable for mounting at the busbar 200mm X 200mm. The actual results in the short-circuit tests and compare with other sensors, such that shunt, are given also.

1. 서 론

대전력 시험 시 흐르는 전류는 수백kA까지의 큰 전류이며 현재 흔히 사용되는 Shunt나 Current transformer(이하 CT)로 단락전류를 측정하는 데는 몇 가지 어려움이 있다. Shunt는 단락회로에 직렬로 삽입되어 시험회로의 임피던스를 증가시키며, 고압시험에서는 시료 1차측에 접속될 경우 측정시스템의 절연에 큰 문제가 있다. CT는 절연확보는 비교적 용이하나 철심의 磁氣포화로 인해 대전류 또는 전류에 DC성분이 포함될 경우에는 측정에 한계가 있다.

Rogowski coil은 그 형태가 관통형 CT와 같으나 내부 철심이 없는 공심 형태이므로 이론상으로 철심포화에 따른 측정전류의 상한이 없으며 일정시간 동안 전류에 포함된 DC성분도 측정이 가능하다. 본 연구에서는 단락 시험에 사용할 Rogowski coil의 개발을 목적으로 한다.

2. 본 론

본 연구에서 제작할 Rogowski coil과 적분기의 사양은 다음과 같다.

- ① 측정전류 : 20kA ~ 200kA
- ② 측정 전류의 $\frac{\text{peak value}}{\text{rms value}} = 2.5$
- ③ 주파수 대역 : 1Hz ~ 1kHz
- ④ 절연 레벨 : 40kVrms, 1분

2.1 Coil 제작

Rogowski coil은 그림1과 같이 균일하게 감은 코일로 이루어지며 코일 단면에 수직 방향의 자속을 감쇄시키기 위해 코일 한쪽 끝을 코일 내부로 관통시켜 제작한다. 코일에 유기되는 기전력 V_{out} 은 다음과 같다.

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

여기서, i 는 측정 전류, M 은 코일의 상호 인덕턴스이다.

$$M = 2\pi \times 10^{-7} \frac{NA}{r} \quad (2)$$

단, A 는 코일의 단면적, r 은 코일의 반경이다. 코일의 출력전압은 적분기 설계에 큰 영향을 주므로 적절히 선정하여야 한다. 코일의 인덕턴스가 작으면 출력

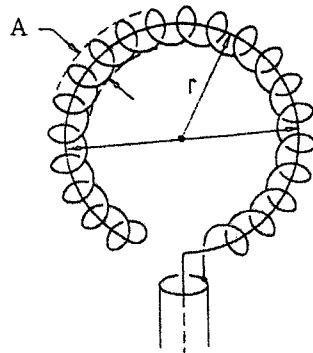


그림 1 코일 개략도

전압이 작아서 적분기 설계에 어려움이 따르며, 너무 클 경우에는 측정 전류의 주파수가 커지면 코일이 자기적분형 코일(self-integrating coil)[1]로 특성이 변하므로 주의해야 한다. 본 연구에서는 coil설치의 편의를 위해 flexible형 코일을 제작하였다. flexible형은 rigid형에 비해 코일이 감기지 않은 부분이 커서 상대적으로 오차가 크므로 이 부분을 최소화하기 위한 노력이 필요하다.

2.2 Integrator 제작

코일의 출력전압은 측정전류의 미분값이므로 전류를 측정하기 위해서는 출력전압을 적분해야 한다. 적분기는 저항과 커패시터로 구성된 passive형과 Op-amp를 사용한 active형으로 나눌 수 있다. 적분기는 제작된 코일의 특성에 따라 설계되며 중요한 요소는 다음과 같다.

- 1) 코일의 출력특성
- 2) 주파수 대역폭 (Frequency bandwidth)
- 3) 측정전류의 시정수

본 연구에서 제작한 코일의 출력이 65.34mV/kA이므로 적분기를 passive형으로 제작할 경우 적분기 출력값이 너무 작다. 따라서 적분기는 active형으로 제작하였다. 적분기의 시정수는 측정전류의 시정수의 20배 이상 되어야 측정전류의 DC성분을 정확히 측정할 수 있다[2]. 본 연구에서는 적분기의 시정수를 20으로 하였다. 일반적인 적분기 회로는 그림2와 같다. 코일의 출력은 식(1)과 같

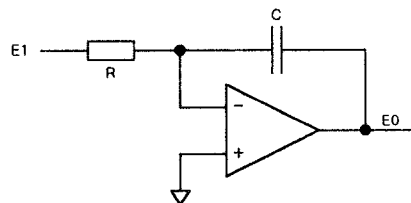


그림 2 적분기의 기본회로

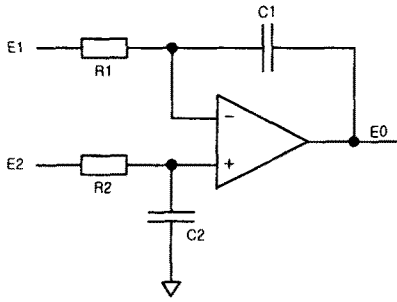


그림 3 차동적분기 회로도

으므로 측정전류의 주파수가 커지면 출력전압의 크기도 주파수에 비례하여 커지게 된다. 그러나 적분기의 출력은 측정전류의 주파수에 관계없이 그 크기에 비례해야 하므로 Op-amp의 비반전 입력단에 low-pass filter를 삽입하여 주어야 한다. 이는 차동적분기 회로와 동일하며 그림3은 차동적분기의 전형적인 형태를 나타낸다. 차동적분기의 출력특성은

$$E_0(s) = \frac{-1}{sC_1R_1} [(E_1(s) - E_2(s)) + \frac{s(C_2R_2 - C_1R_1)}{1 + sC_2R_2} E_2(s)] \quad (3)$$

이 되므로

$$CMRR \approx \frac{|1 + sC_2R_2|}{|s(C_2R_2 - C_1R_1)|} \quad (s \rightarrow j\omega) \quad (4)$$

가 된다. 따라서 차동적분기는 양쪽 입력단의 RC시정수를 동일하게 하여 CMMR를 좋게 해야 한다. 적분기에 사용되는 콘덴서는 ①절연저항이 크고 누설전류가 작은 것 ②유전체 손실이 작은 것 ③저항 및 인덕턴스 성분이 작은 것 ④경년변화가 작은 것을 선택한다. 이런 특성의 콘덴서로는 폴리카보네이트, 폴리프로필렌, 테프론 등의 콘덴서가 있다. 그러나 이런 콘덴서로서 용량이 큰 제품은 구하기 어려워, 본 연구에서는 10μF의 무극성 전해 콘덴서를 사용하였다. Op-amp의 입력 오프셋 전류의 영향을 줄이기 위해 시정수 CR이 정해진 경우 C를 크게 하고 R을 작은 값으로 선택하는 것이 유리하다.

2.3 실험

본 연구에서 제작한 코일과 적분기는 그림 4와 같다. 코일 외부는 시험회로에 설치하기 위해 절연판으로 밀봉되었다. 코일의 치수 및 특성값은 표 1과 같다. 코일과 적분기는 20m 길이의 RG-58U 동축케이블로 연결되었

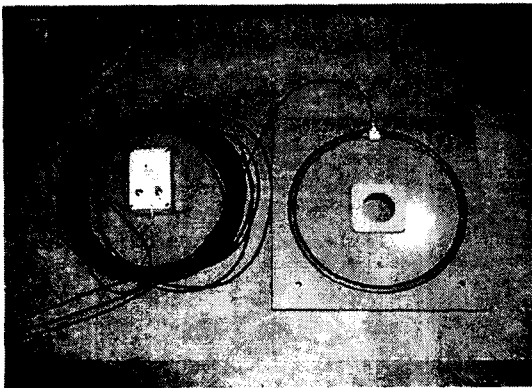


그림 4 Rogowski coil 및 Integrator

다. 실험은 LG산전 전력시험기술센터에서 진행되었으며, 측정시스템 및 대전력 시험 설비의 구성과 특성에 대한 내용은 참고문헌 [4]에 자세히 소개되어 있다.

표 1. 코일 특성표

코일 직경 (중심)	310mm
코어	14mm, PVC hose
코일 턴수	900
자기 인덕턴스	178.8μH
저항	4.77Ω

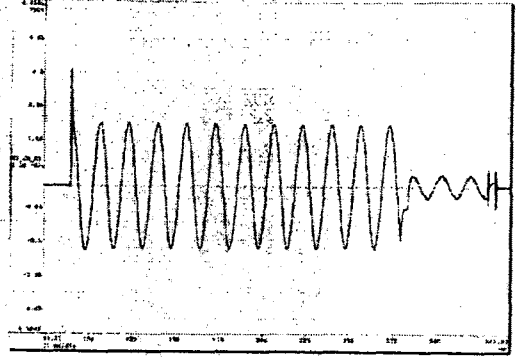


그림 5 코일 출력전압

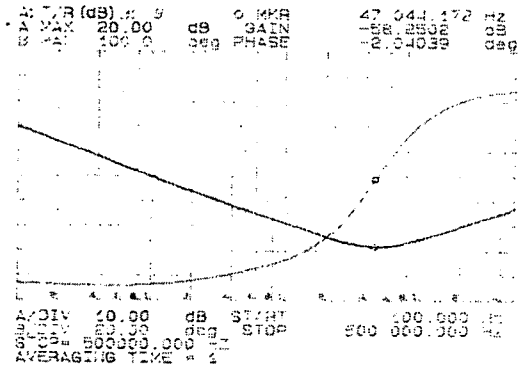


그림 6 적분기 주파수 특성

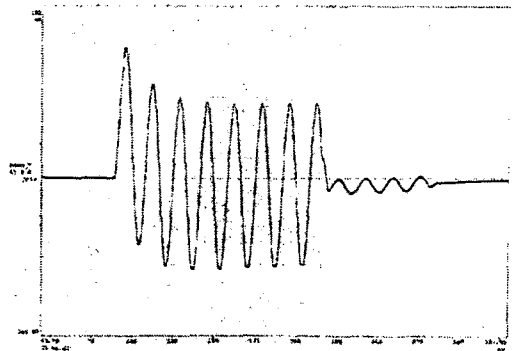


그림 7 Input offset voltage의 영향

그림5는 코일의 출력전압을 나타낸다. 이 출력값을 기본으로 적분기의 출력값을 결정하는 calibration을 시행한다. calibration은 코일의 출력과 동일한 값의 전압을 function generator로 발생하여 적분기에 인가하고 이에 대한 적분기의 출력이 원하는 값으로 되도록 적분기의 증폭율을 조정하였다. 본 연구의 적분기 sensitivity는 90kA/V이다.

그림6은 적분기의 주파수 특성이다. 전술한 바와 같이 적분기의 gain은 주파수가 커짐에 따라 -20dB/decade 만큼 작아져야 하며, 위상은 코일의 출력이 원래 전류와 90° 만큼의 위상차를 가지므로 -90 또는 90°의 위상차를 가져야 한다. 시험결과 gain은 35kHz까지 위상은 1kHz까지 적분기 특성을 유지하는 것으로 판단된다.

그림7은 단락시험 전류 파형이다. 파형에서 음의 피크 부근이 심하게 왜곡되어 있는 것을 볼 수 있다. 이는 Op-amp의 입력 옴셋 전압에 의한 것으로 Op-amp의 balance단자에 적절한 potentiometer를 연결하고 balance를 조정하면 쉽게 해결된다.

그림8은 단락시험을 위한 회로 calibration시험의 측정 결과이다. 위 파형(I_s)은 전력시험기술센터의 측정 파형이고 아래 파형(ROGO_s)은 본 연구에서 제작한 Rogowski coil의 측정 파형이다. 측정 결과는 다음과 같다.

	I _s	ROGO _s	오차
peak	126.1kA	130.0kA	3.1%
r.m.s	62.06kA	62.68kA	1%

두 측정 결과 사이의 오차는 차동 적분기 양쪽 입력단의 시정수 매칭의 어려움, 적분기에 사용된 커패시터의 특성에 기인한 것으로 판단된다.

그림9는 한류차단 시험의 측정 파형이다. 파형에서와 같이 한류차단 시의 전류는 수ms 이내에 영점으로 감소하므로 적분기의 고주파 특성을 파악할 수 있다. 두 측정 결과의 차이는 30μs로서 전기각 0.65° 이었다.

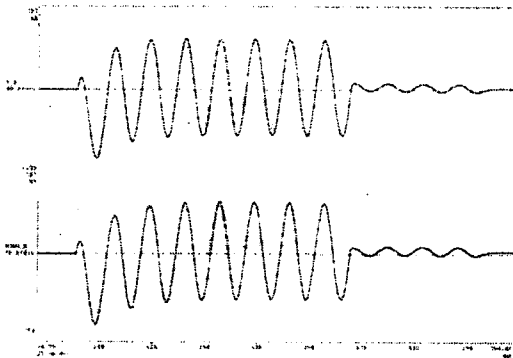


그림 8 비교시험 결과

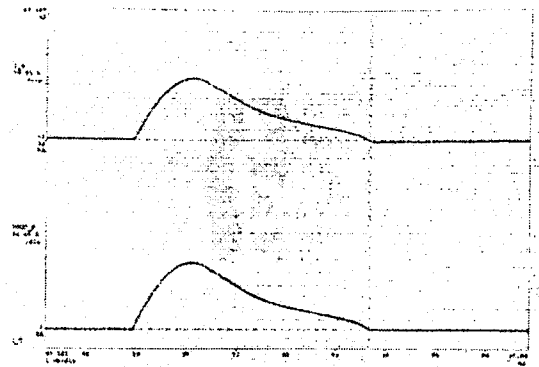


그림 9 한류차단 시험 측정 결과

3. 결론

단락시험 전류 측정을 목적으로 Rogowski coil 개발을 목적으로 차동증폭기를 사용한 적분기와 flexible형 coil을 개발하였다. 본 Rogowski coil로 단락전류를 측정하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) DC성분이 포함된 AC전류를 오차 3%의 정밀도로 측정 하였다.
- 2) 한류된 전류를 측정하여 전류 영점을 측정한 결과 전기각 1° 이내의 오차를 가졌다.

본 결과를 토대로 측정오차를 줄이기 위해 다음사항에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 생각된다.

- 1) 적절한 시정수 매칭 방법 개발
- 2) 정밀한 calibration을 위한 방법 개발
- 3) 작은 용량의 커패시터로 큰 시정수를 실현할 수 있는 적분회로에 대한 연구

(참 고 문 헌)

[1] Donald G. Pellinen, Marco S. Di Capua, Stephen E. Sampayan, Harold Gerbracht, and Ming Wang, "Rogowski coil for measuring fast, high-level pulsed currents", Rev. Sci. Instrum. 51(11), pp1535~1540, 1980

[2] J.A.J. Pettinga and J.Siersema, "A polyphase 500kA current measuring system with Rogowski coil", IEE Proc. Vol.130, Pt.B, No.5, pp360~363, 1983

[3] Richard Lundin, "A Handbook Formula for the Inductance of a Single-layer Circular Coil", IEEE Proc. Vol.73, No.9, pp1428, 1985

[4] 함길호, 박지훈, 이희철, 나철봉, 배극현, 박종화, "대전력 시험기술 및 설비에 대한 고찰", 전기학회지, Vol.49, No.5, pp51~59, 2000