

100kA 급 급준 펄스 대전류 측정을 위한 Rogowski형 전류 측정장치

이상욱<sup>1</sup>, 장용무<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>이엠디, <sup>2</sup>한양대 퓨전전기기술응용연구센터

Rogowski Current Sensor for 100kA class Steep Pulse Measurement

Sang-woog LEE<sup>1</sup>, Yong-moo CHANG<sup>1,2</sup>

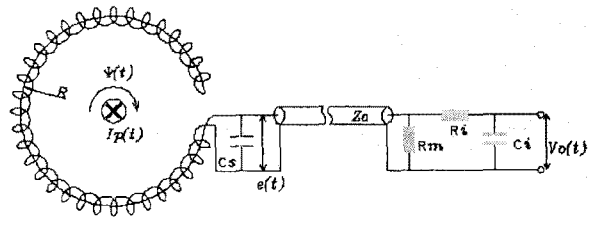
<sup>1</sup>EMD, <sup>2</sup>Hanyang Univ. EFT Center

**Abstract** - In this paper, for measuring 100kA class steep pulses, Rogowski pulse current sensor has been designed by EMD and then calibrated with discharged circuit. The operation range of designed sensor is 20 kHz ~ 50 MHz, 1 ~ 100 kA.

$$\epsilon(t) = -M \frac{dI_p(t)}{dt} \quad [V] \quad (1)$$

1. 서 론

일반적으로 대전류를 측정하는 방법은 철심형 CT(Current Transformer)와 분류기(Shunt)등이 가장 보편적으로 사용되고 있다. Shunt는 단락회로에 직렬로 삽입되어 회로의 임피던스를 증가시킴으로서 측정의 오차 및 전력소비를 발생시키며 고전압 시험환경에서 측정시스템의 절연에 큰 문제를 야기시킬 수 있다.[1] 철심형 CT는 절연확보는 비교적 용이하나 철심의 磁束포화로 인해 측정 전류범위에 한계가 있을 뿐 아니라,[1] CT를 설치하기 위해서 시험 회로를 분리해야 하는 번거로움이 있다.



<그림 1> 로고스키코일과 RC적분기의 개념도

1912년 Rogowski(로고스키)에 의해 공심코어를 이용한 솔레노이드 코일을 이용한 대전류 펄스 측정기술이 제안된[2] 이후, 초고속 대전류 펄스 측정을 위한 최적의 수단으로 다양한 활용을 위한 연구가 이루어졌으며, 최근에는 전력설비분야의 전력 IT화를 위한 계기 및 보호용 전류 측정센서를 비롯한 다양한 분야에 적용이 되고 있다. 로고스키 코일은 자성체 코어를 사용하지 않기 때문에 피측정 전류에 의한 자속포화현상을 일으키지 않아 측정전류범위 및 응답 주파수 대역에 대한 제한이 거의 없으며, 코일의 외형을 측정대상 도체의 모양이나 용도에 따라 다양하게 변형시킬 수 있을 뿐 아니라 경량, 소형화가 가능한 장점이 있다. 이러한 다양한 장점 및 특성으로 인하여 플라즈마 장치나 펄스 파워 시스템 등에서 펄스형 대전류 측정에 최적의 수단으로 자리매김하고 있다.

여기서 M은 상호인덕턴스로 CT와는 달리 비자성 코어를 사용하기 때문에 크기가 매우 작다. 식 (1)과 같이 코일 양단에 발생하는 역기전력  $\epsilon(t)$ 는 피측정 전류의 미분 파형으로 발생하게 되므로 실제 전류 파형을 알기 위한 적분회로는 <그림 1>과 같이 수동소자인 저항( $R$ )과 커패시터( $C$ )를 이용해서 간단한 적분회로를 구성하였다.

$$V_o(t) = \frac{1}{RC} \int \epsilon(t) dt \quad (2)$$

식(2)의 회로 시정수  $\tau = RC$ 는  $RC \gg T$  [sec]의 조건이 만족해야만 하며, 여기서  $T$ 는 측정 전류의 1 사이클에 해당하는 주기이다. 이외에도 대표적인 적분 방식에 저주파 전류 측정시 널리 이용되고 있는 반도체 소자를 이용한 능동적분(active integration)과 고주파 전류 측정시 용이한 자기적분(self integration) 등을 들 수 있다.

2. 본 론

2.1. Rogowski Coil

로고스키 코일의 구조는 일반적으로 유전체와 같은 비자성 코어 솔레노이드를 도너츠와 같이 둥글게 말아 놓은 형태로 <그림 1>과 같다. 그리고 반지름이 R인 one-turn search coil로 작용하는 것을 방지하면서 코일에 유기된 전류에 의한 자속을 상쇄시켜 측정의 정밀도를 높일 수 있도록 <그림 1>에 보는 바와 같이 솔레노이드 한쪽 끝에서 return loop를 갖도록 한다. 이는 코일의 양단을 같은 위치에 배치할 수 있는 장점이 있어[3] 도체에 손쉽게 착탈할 수 있는 flexible coil 제작을 가능하게 한다.

2.2. Transducer의 설계 제작과 Calibration

Transducer 설계 제작(ERC100F by EMD)

로고스키 코일의 출력은 식 (1)에 나타난 바와 같이 주파수  $f$ 와 피측정 전류  $I_p(t)$ 에 비례한다. 그러나 실제 제작된 코일과 적분회로 등에는 부유용량(stray capacitance,  $C_s$ ) 성분과 부유인덕턴스(stray inductance,  $L_s$ ) 성분이 존재하며 이들의 결합(coupling)으로 인해 출력이 주파수에 대해 비선형적이며 노이즈 발생의 원인이 되기도 한다. 그러므로 코일 권선 시에 코어 단면적이 균일하도록 등간격(等間隔)을 잘 유지하여 제작하는 것이 중요하다. 또 코일과 피측정 전류의 용량성 결합(capacitive coupling)으로 인하여 발생하는 고주파 노이즈를 방지하기 위한 정전차폐는 피측정 전류에 의한 자속이 코일과 쇄교될 수 있도록 슬릿을 두어야 하며, 차폐층 두께가 최대 주파수에서의 표면효과(skin effect)에 의한 표면깊이(skin depth)보다 얇게 되도록 설계해야 한다.[4]

로고스키 코일의 기본원리는 “電磁誘導法則”에 근거를 두고 있으며, 식 (1)과 같이 표현된다. 피측정 전류( $I_p(t)$ , 1차 전류)가 흐르는 도체를 감싸는 모양으로 로고스키 코일을 설치하여,  $I_p(t)$ 에 의한 자속  $\Psi(t)$ 에 의해 코일에 역기전력이 유도된다. 이것은 다음 식으로 간략하게 나타낼 수 있다.

적분회로 설계시에 피측정 전류에 대한 측정감도를 손쉽게 조절할 수 있도록 가변저항을 이용하였으며, 이때 주의해야 할 것은 가변저항의 인덕턴스 성분이 신호 왜곡에 많은 영향을 미치게 되므로

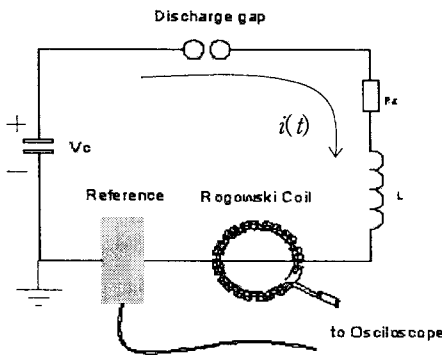
충분히 큰 고정저항과 가변저항을 병렬 연결함으로써 가변저항의 인덕턴스로 인한 파형 왜곡현상을 감소시키면서 측정감도를 원하는 값으로 조절을 할 수 있도록 하였다. 또한 <그림 1>에서 보여주듯이 측정 케이블 종단 저항  $R_m$ 가 적분기의 임피던스  $Z_i$ 에 의해 영향을 받는 것을 줄이기 위해  $R_m \ll Z_i$  (즉,  $R_m // Z_i \approx R_m$ )가 되도록 하였다.

<표 1> ERC100F의 사양

로고스키 코일	단면	50[mm <sup>2</sup> ]
	내경	100[mm]
	외경	116[mm]
	권선수	100[turns]
적분회로정수	정합 저항 ( $R_m$ )	50[Ω]
	적분 저항( $R_i$ )	27.7[kΩ]
	적분 콘덴서( $C_i$ )	6.8[nF]
측정 감도	0.0001[V/A]	
주파수 범위	30[kHz]~100[MHz]	
전류 범위	1[kA]~100[kA]	

**Calibration(교정)**

본 연구에서 설계 제작된 ERC100F의 성능 검증을 위하여 교정회로(calibration)는 비교기와 수 [MHz]이상의 고주파 전류를 발생시킬 수 있는 전류원이 요구된다. 본 연구에서는 <그림 3>와 같이 충전된 커패시터 에너지를 스파크 갭 스위치(Spark gap S/W)를 이용하여 순간적인 방전 펄스전류를 발생시키는 전류원을 제작하여 감쇠 진동하는 방전전류를 측정할 수 있도록 하였다.



<그림 3> 방전전류원을 이용한 교정회로

적분회로 특성은 함수발생기(HP제품)의 정현파 출력을 적분회로에 인가하여 회로 출력의 적분여부를 확인하였고, 이어서 로고스키 코일과 적분회로를 결합하여 <그림 3>과 같은 방법으로 비교기의 출력파형과 비교하면서 신호크기와 주기를 저항 조정으로 측정감도를 교정하였다.

전류원은 충전전압 30[kV], 2[nF]의 무라타사 세라믹 커패시터를 직·병렬 연결하여 커패시턴스를 조절하였고, 회로 인덕턴스는 방전 루프(loop)의 도체 길이를 변화시켜 R과 C의 직렬공진을 이용하여 다양한 주파수의 전류가 발생되도록 제작하였다.

<표 2> 교정시험용 측정기

방전전류원	이엠디(EMD) 자체제작
함수발생기	HP 3324A
오실로스코프	Tektronix and LeCroy wave surfer 454
비교기	PEM-CWT15 (1 class)

**2.3. PSpice 시뮬레이션 및 실험결과**

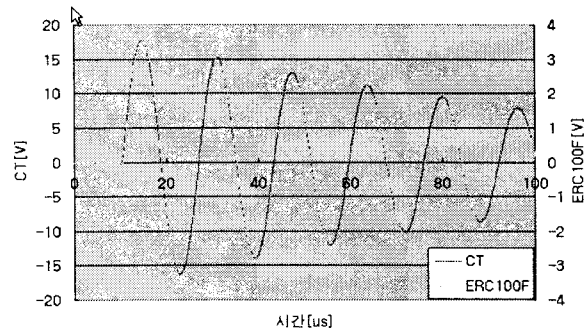
자기인덕턴스  $L$ 인 인덕터에 흐르는 전류  $I_L(t)$ 에 의한 전압  $V_M(t)$ 를 구하는 식으로부터  $L$ 과  $I_L(t)$ 를 식 (1)의 상호 인덕턴스  $M$ 과 피 측정 전류  $I_M(t)$ 로 바꾸게 되면 식 (3)에서 표현된 상호인덕턴스에

의한 전압  $V_M(t)$ 을 얻을 수 있다.(단,  $I_M(t)$ 는 식 (1)의  $I_L(t)$ 와 같다.)

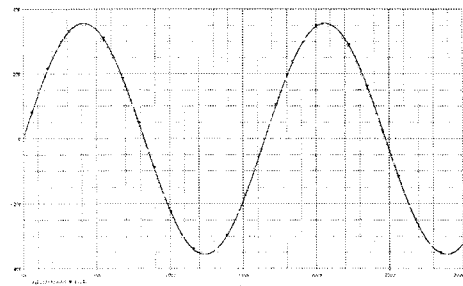
$$V_M(t) = -M \frac{dI_M(t)}{dt} \quad [V] \quad (3)$$

다음은 위의 식(3)을 바탕으로 회로 모델링하여 PSpice로 시뮬레이션한 결과파형과 <그림 3>의 교정회로에 의한 측정파형을 비교함으로써 시뮬레이션 결과가 충분한 신뢰성을 가지고 있음을 확인하였고, 이 시뮬레이션 결과로 설계 회로정수를 결정할 수 있었다. <그림 4>(a)의 초기 주파수가 약 60.6[kHz], 방전전류( $I_{peak}$ )가 약 35.6[kA]인 감쇠진동파를 실측하여 그 파형을 바탕으로 동일 주파수 동일 크기의 전류(정현파)를 입력 파라미터로 설정하여 PSpice로 시뮬레이션한 결과를 <그림 4> (b)에 나타내었다. 두 파형을 비교해 보면 실측값과 시뮬레이션 값이 잘 일치 하고 있음을 알 수 있다.(Pearson CT의 감도는 0.0005[V/A]이며 1/10 Attenuator를 사용하여 총 0.00005[V/A]이고 ERC100F의 감도는 0.00001[V/A]이다.)

ERC100F와 pearson CT의 비교파형



(a) 실측 파형



(b) 시뮬레이션 파형

<그림 4> 실측파형(a)과 시뮬레이션 파형(b)

**3. 결 론**

본 연구에서 시뮬레이션을 바탕으로 설계 제작된 ERC100F 로고스키 펄스전류 측정센서의 특성 분석을 위해 방전 전류원을 이용하여 주파수를 가변하며 교정을 실시하였고, PSpice 시뮬레이션 결과와 비교하면서 회로정수를 검증함으로써 ERC100F의 성능을 입증하였다. 또한 본 연구결과로부터 제시한 시뮬레이션 방법이 센서 제작시의 최대한 이론적인 결과 값에 근사시킬 수 있는 확실한 기준이 될 수 있음을 확인할 수 있었다.

**[참 고 문 헌]**

- [1] 이용신, 박지훈, 함길호, 최원석, 장용무, "단락전류 측정용 Rogowski coil 개발", 대한전기학회, 하계학술대회 논문집, pp787~789, 2000
- [2] Rogowski, W and Steinhaus, W:Arch. Elektrotech 1, 141-150, 1912
- [3] P.N.Murgatroyd and D.N. Woodland, "Geometrical Properties of Rogowski Sensors", IEE Colloquium on Low Frequency Power Measurement and Analysis, pp9/1~9/10, 1994
- [4] J. Cooper, "On the High-frequency Response of a Rogowski Coil", Plasma Physics, Vol.5, pp285~289, 1963