

## 부분방전전류측정을 위한 로고스키코일의 적용에 관한 연구

### Study about the Application of Rogowski Coil for measuring Partial Discharge Current

이강원\*

윤성철\*\*

김명룡\*\*

백광선\*\*

나동희\*\*\*

Lee, Kang Won\* Yoon, Sung Cheol\*\* Kim, Myung Yong\*\* Baik, Kwang Sun\*\* Na, Dong Hee\*\*\*

#### ABSTRACT

Rogowski coil is a kind of sensor for high amplitude and very short period current and suitable for the measurement of PD pulse. This paper have simulated the relations between PD signals and Rogowski coil which has its own equivalent circuit and investigated signals of Rogowski coil induced by PD pulse current and compared with the PD signal obtained from conventional PD measuring system in accordance with IEC60270.

#### 1. 서론

부분방전은 절연열화를 나타내는 하나의 징후이며 동시에 절연물질에 심각한 손상을 일으킬 수 있는 요인이다. 기존의 부분방전 검출법은 수십년동안 적용되어 왔다. 대부분의 기존 검출기들은 시험체의 단자에서 전압 또는 전류신호를 측정하기 위하여 단일 입력검출법을 사용한다. 부분방전로에 결합입력된스를 연결하고 이곳으로부터 아날로그신호를 받아 처리하는 것이 기본이다. 이러한 기존의 부분방전 검출법은 on-line/on-site monitor를 행하는 경우 주변 잡음의 영향과 처리장비 그리고 내부적으로 설치가 어려운 센서등에 의하여 그 사용이 매우 제한되므로 이러한 부분방전검출법들은 실험실에서 측정하는 방법으로서 제한되어 있다. 기존 설치된 장비에 대한 최소한의 영향을 주며 on-site 부분방전 측정을 행할 수 있는 방법으로서 전자기파를 검출하기 위한 UHF법, 초음파를 측정하기 위한 초음파 센서측정법, 전류에 의한 자속변화를 검출하는 로고스키코일에 의한 측정법등이 제안되고 있다. 부분방전 검출센서로서 Rogowski coil은 상호인덕턴스를 이용하는 전류측정 센서이며, 1차측 전류(부하전류)에 의해 자속이 발생하고 이 자속이 2차 코일에 채교하여 시간적인 변화를 할 때 2차 코일에 유가 되는 전압을 이용하여 전류를 측정한다. Rogowski coil이 갖는 가장 큰 장점은 자성체를 코어로 이용하는 기존의 CT와는 달리 공심이거나 비자성재료를 사용하기 때문에 자기적으로 포화되지 않는다는 것이다. 따라서 저전류 영역에서 대전류영역까지 선형적으로 전류를 측정할 수 있다. 또한 넓은 주파수 범위에서도 측정이 가능하며 1차측 도체와 전기적으로 연결되어있지 않아 단락전류에 강하고 출력에 전압의 형태이므로 다른 디지털 보호 릴레이를 구동시킬 수도 있다. 그리고 코일을 1차측 도체에 감기만 하면 되는 간단한 구조로 대전류 방전장치, 고온 플라즈마 발생장치 및 고속 스위칭 전력전자

\* 한국철도기술연구원 주임연구원, 정회원

\*\* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

\*\*\*충북대학교 석사, 비회원

회로 등에서 전류 측정센서로서도 활용 가능한 것으로 알려져 있다.

본 논문에서는 on-line법으로 저렴한 경비로 부분방전을 감시할 수 있는 방안으로 로고우스키 코일을 이용한 부분방전 측정법을 제시하고자 모의 전극계에서 발생된 부분방전에 대한 등가회로에 의한 해석 및 모의실험등을 통해 방전에 대한 센서출력결과를 이해하고, 실제 전극구성을 통해 자작된 로고우스키코일을 이용하여 부분방전을 측정하여, 측정결과와 모의 해석결과와의 차이점을 고찰하고자 한다.

## 2. 본론

### 2.1 로고우스키코일의 측정원리

로고우스키 코일은 비자성코어 ( $\mu = \mu_0$ )에 감겨진 권선으로 구성되고, 코일은 그림 1과 같이 부하전류가 흐르는 도체 주위에 위치된다.

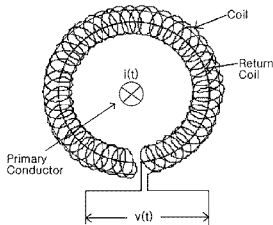


그림 1. The structure of Rogowski coil

코일에 유기되는 전압은 다음식에 의하여 정의된다.

$$v(t) = -\frac{d}{dt} \left( \sum_{j=1}^N \Phi_j \right) \quad (1)$$

$\Phi_j$ 는  $j$  번째 권선에 대한 순시 자속이고,  $v(t)$ 는 코일 출력전압이다. 코일에서의 총자속은 다음의 식으로 주어진다.

$$\Phi = \oint dl \int_s \mu_0 \vec{H} nd\vec{S} = \mu_0 nSI \quad (2)$$

$\Phi$ 는 총자속 그리고  $l$ 은 코어의 길이,  $n$ 은 권선밀도(단위길이당 권선),  $S$ 는 코어의 단면적 그리고  $H$ 는 자계의 세기이다. 만약 코어는 일정한 단면적을 가지고 그리고 와이어가 일정한 밀도로 중앙선  $l$ 에 수직인 권선이라면 유기전압  $v(t)$ 는

$$v(t) = -\mu_0 nS \frac{d}{dt} \left[ \sum_j i_j(t) \right] = -M \frac{d}{dt} \left[ \sum_j i_j(t) \right] \quad (3)$$

이다.  $\mu_0$ 은 공기의 투자율이고  $i(t)$ 은 1차측 전류, M은 코일의 상호 인덕턴스이다. 식(3)에서 알 수 있듯이 출력전압은 측정 전류의 시간적 변화율에 비례한다.

## 2.2 실험방법 및 구성

본 논문의 실험에서는 부분 방전원으로서 침대 평판전극 구조를 사용하여 공기 중에서 부분방전을 발생시켰다. 침 전극은 구리전극을 사용 하였고, 평판전극 모서리에서의 부분방전을 막기 위하여 모서리부분을 가능한 한 원형을 유지하게 만들었다. 부분방전측정은 실온상태에서 행하여 졌으며, 로고스키코일에서의 측정신호와의 비교를 위하여 Biddle 사의 부분방전측정기를 이용하여 동시에 측정 및 관찰하였다. 측정된 신호는 오실로스코프(Tektronix 620A, 5GHz)로 확인되어 저장되고, 저장된 신호는 신호 파형 분석 및 주파수 영역분석(FFT)을 위하여 컴퓨터로 전달되었다. 본 측정에서는 적분기의 연결없이 로고스키 코일만을 사용하였으며, 부분방전원의 접지측에 설치하였다. 로고스키 코일은 측정 오차를 줄이기 위하여 가능한 코일중심으로 접지선이 통과하도록 장치되었고, 외부 전자기노이즈를 줄이기위하여 twist wire를 사용하여 오실로스코프의 프로브에 연결하였다. 각 인가전압시 1분 이내에 측정이 행하여 졌고, 2분이 흐른 후 전압을 상승하였으며, 이때 상승속도는 0.5kV/s이다.

도표 1. Specification of Rogowski Coil

로고스키코일 반지름	$R_o=88.7\text{mm}$
코일 단면의 반지름	$r=6.7\text{mm}$
사용된 에나멜선의 직경	$d=0.31\text{mm}$
단위길이당 권회수	$n=2900 \text{ turn/m}$

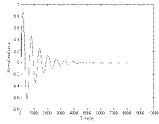
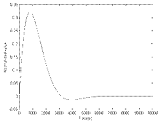
## 2.3 실험결과 및 고찰

### 2.3.1 부분방전전하량과 방전전류

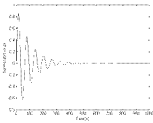
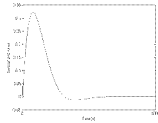
부분방전에 의하여 발생된 전하는 전극으로 들어가거나 공간전하와 결합하여 소멸되며, 이러한 전하량의 변화는 도선에 흐르는 전류로서 나타나며, 이러한 전류를 계측함으로써 부분방전전하량에 대한 유사한 값을 얻을수 있다. 본 논문에서는 부분방전발생시 흐르는 전류와 방전전하량과의 관계를 구하기 위하여 우선, 부분방전과형이 단펄스형태를 나타낸다고 가정하여, 부분방전에 의한 방전전하량  $q$ 에 대한 식을 다음과 같이 표현하였다.

$$q = Q_m e^{-\alpha t} \cdot \sin \omega_0 t \quad (4)$$

이때  $Q_m$ 은 최대 방전전하량이고,  $\alpha$ ,  $\omega_0$ 는 각각 감쇠정수와 공진주파수를 나타내며, 그림 2는 각 파라메터를 변화시켰을 때의 파형의 모습을 나타낸다.



(a)  $\alpha=0.1, \omega_0=0.1, Q_m=1$ 인 경우      (b)  $\alpha=0.1, \omega_0=1, Q_m=1$ 인 경우



(c)  $\alpha=1, \omega_0=1, Q_m=1$ 인 경우      (d)  $\alpha=1, \omega_0=10, Q_m=1$ 인 경우

그림 2. Pulse simulated by changing parameters( $\alpha, \omega_0$ ) for equation (4.1)

그림 2에서 알 수 있듯이  $\alpha$ 의 값을 증가시키면 펄스폭이 감소를 하며,  $\omega_0$ 의 값을 증가시키면 감쇠진동이 발생한다. 이와 같은 현상은 방전전하펄스를 측정하는 경우 측정된 파형에서 보이는 경우와 상당히 유사하다는 것을 알 수 있으며, 이러한 사실을 바탕으로 하여 방전전하에 의하여 1차측에 흐르는 전류를  $I_1$ 이라고 로고스키코일에 유기되는 전류를  $I_2$ 라 할 때  $I_2$ 에 대한 식은 식(4)을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I_1 = -\frac{dq}{dt} = Q_m (-\alpha \sin \omega_0 t + \omega_0 \cos \omega_0 t) \quad (5)$$

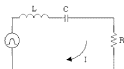
$$I_2 = M \frac{dI_1}{dt} = CM \cdot Q_m \sin(\omega_0 t - \theta) e^{-\alpha t} \quad (6)$$

이때  $C = \sqrt{(\alpha^2 - \omega_0^2) + (2\alpha\omega_0)^2}$ 이며,  $\theta = \tan(2\alpha\omega_0 / (\alpha^2 - \omega_0^2))$ 이다. 그러므로  $I_{2m} = CM \cdot Q_m$ 으로서 평가할 수 있으며, 반대로  $I_{2m}$ 을 아는 경우,  $Q_m = I_{2m} / CM$ 을 이용하여 최대방전전하량을 구할 수 있다.

### 2.3.2 부분방전전류에 대한 로고스키코일의 등가회로 해석

로고스키 코일은 그림 1과 같은 구조이기 때문에 이 코일자체의 등가회로는 RLC 적멸회로로 표현 가능하다. 여기서 C는 코일의 출력단자 사이에 존재하는 stray 용량이 된다. 임피던스 분석기(HP 4194A)에 의해서 측정된 결과  $R=4.8409 \Omega$ ,  $L=573.227nH$ ,  $C=312.086pF$  이고 공진주파수는 11.9MHz 였다. 코일에 의한 전류 측정시 로고스키 코일을 포함한 측정계의 등가회로는 그림 3(a)와 같이 표현할

수 있다. 로인된 등가회로에 부분방전을 모의하여 10ns와 1ns의 펄스전원을 인가한 경우 저항 표에 전리는 전압파형은 그림 3(b)와 (c)에 작자 보여진다. 그림에서 보는 바와 같이 감쇠전압을 일으키는 파형의 형태를 나타낸다는 것을 알 수 있으며, 이것은 로고스키코일에 의하여 부분방전펄스전압을 측정하는 경우, 로고스키코일의 표류용량(C)과 로인인덕턴스(L)에 의하여 측정파형이 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.



(a) Equivalent circuit



(b) 10ns의 펄스폭을 가진 전압이 인가된 경우

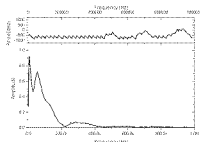
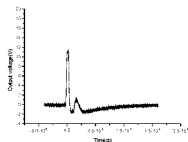


(c) 1ns의 펄스폭을 가진 전압이 인가된 경우

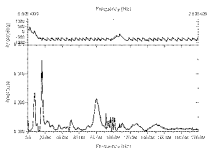
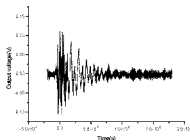
그림 3. Equivalent circuit and waveform of Rogowski Coil

### 2.3.3 로고스키코일/부분방전측정기 출력신호 비교분석

로고스키코일은 광대역 센서로서의 주파수특성을 가지고 있다. 이러한 주파수특성에 의하여 로고스키코일을 이용한 부분방전을 측정하는 경우 또는 오실로스코프를 이용하여 측정하는 경우 피분신호의 간섭을 받지 않는 주파수 영역에서의 측정을 위한 선택형 주파수대역을 설정할 수 있다. 여러 주파수 영역을 살펴본 후 신호의 왜곡이 가장 적은 주파수 영역을 설정하여 측정된 신호파형이 그림 4에 보여진다. 그림 4(a)는 Bickel사의 부분방전측정기에서 출력되는 방전신호 및 FFT결과를 보여준다. 그림에서 보는 바와같이 부분방전측정기의 출력신호는 0~400kHz대역의 주파수분포를 보여주며, 이는 20Hz ~ 300kHz의 주파수대역을 갖는 부분방전측정기의 특성을 잘 보여주는 것이다. 이에 반하여 그림 4(b)의 주파수분포는 로고스키코일에 대하여 측정된 중심 주파수 11.9MHz에서 절두치를 보여주지 않고 11.9MHz이하인 8MHz와 11.9MHz 윗부분인 18MHz에서 절두치를 보여주고 있으며, 또한 80MHz에서 절두치를 보여준다. 이러한 결과는 예상외의 결과로서 원인으로서는 로고스키코일과 오실로스코프사이의 수직인덕턴스 및 표류용량 등에 의한 공진점의 변경등을 꼽 수 있다. 그러므로 로고스키코일의 적용시 코일의 출력단에 대한적절한 정합회로로 채택도 매우 중요하다는 것을 알 수 있다. 또한 100MHz 근방에서 절두치가 나타나는 것은 FM 방송국의 외부 노이즈에 의한 영향이라는 것을 알 수 있는데, 로고스키코일은 그 자체가 외부노이즈에 영향을 거의 받지 않는다는 것을 고려하면 로고스키코일의 출력단과 오실로스코프의 입력단부에서의 노이즈간섭이 수평인으로서 생가지므로, 이러한 단말부 분에서의 외부노이즈방기대책도 아울러 요구된다.



(a) Waveform and FFT of PD Detector



(b) Waveform and FFT of Rogowski Coil

그림 4. Waveform Comparison for Rogowski Coil and PD detector signals

### 3. 결론

로고스키코일을 이용하여 부분방전을 측정할 경우, 로고스키코일 자체의 내부특성을 아는 것은 매우 중요하며, 이러한 내부특성과 부분방전이 어떻게 결합되는가를 이해하는 것이 중요한 것이다. 본 논문에서는 이러한 로고스키코일과 부분방전과의 결합관계를 부분방전전류에 대한 로고스키코일의 등가회로를 통하여 확인하였고, 확인된 결과를 토대로 보인된 침대평관전극에서의 부분방전전류를 측정하여 기존 부분방전계측기와 비교하였으며, 이러한 결과를 토대로 로고스키코일에서의 개선할 부분에 대하여 고찰하였다. 부분방전전류는 짧은 펄스로서 로고스키코일에 의한 측정에 적합하다고 볼 수 있으나 그 크기가 매우 미약하므로 정확한 부분방전전류를 측정하기 위하여 적전류에서도 감도가 좋은 로고스키코일의 개발이 필요하다.

### 참고문헌

1. Ray, W.F.; Hewson, C.R., "Rogowski transducers for measuring large magnitude short duration pulses", Pulsed Power 2000 (Digest No. 2000/053), IEE Symposium , 2000, Page(s): 23/1 -23/4
2. Turner, G.R.; Hofsajer, LW. "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
3. 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