

로고스키코일을 이용한 기중 방전 신호 검출

박성희, 이용희, 이강원, 김길수*, 김성화**, 임기조
 충북대학교, LG신전(주)*, 충청대학**

Air Discharge Detection using Rogowski Coil

S. H. Park, Y. H. Lee, K. W. Lee, K. S. Kim*, S. H. Kang**, K. J. Lim
 Chungbuk Univ, LG Industrial co*, Chungcheong college**

Abstract - At present, the variable sensors are applied to detect PD pulse signals, UHF sensor, AE sensor and etc. In this paper we used the Rogowski sensor to detect PD pulse signals in air. We did performed test simulation and niddle to plane electrode structure for PD source. We compared Rogowski sensor with conventional type PD detector to detect discharge signals in air.

1. 서 론

전기기기의 사용에 있어서 결합이 절연체 내부에 존재 하게 되면 부분방전이 발생하게 된다. 부분방전이 지속 이 될 경우 절연열화로 인한 절연파괴가 발생하게 되고 이는 계통사고로 진전이 되어 그에 대한 파급효과로 인 해 막대한 손실을 입을 수 있다. 이러한 사고는 전기의 공급에 대한 질을 평가하는 지표인 안정도 및 신뢰성에 상당한 저해 요소로 작용한다. 우선적으로 부분방전이 발생되지 않도록 제품을 제조하는 것이 확실한 방법이지 만 제품의 제조시에는 이러한 결합이 포함이 된 경우가 발생할 수 있다. 결합은 다양한 형태로 존재하며, 이들 결합들에 의해 발생하는 부분방전의 형태 또한 결합의 종류와 무관하지 않다.[1-3]. 그러므로 제품이 사용되 기 전에 결합에서 발생하는 부분방전 발생시 초기에 방 전신호를 검출할 수 있다면 큰 사고로의 진전 없이 부분 방전의 원인을 파악하여 사고를 미연에 방지할 수 있다. 현재 부분방전에 대한 검출방법으로서 UHF Sensor [4], AE Sensor[5]를 이용한 신호 검출 및 해석에 대 해 활발한 연구가 진행되고 있다. 또한 배전계통의 전류 측정에 있어서 종래에는 CT를 사용하였지만, 코아의 포 화특성으로 인한 오차가 발생이 되어 이로 인해 전류측 정의 범위가 제한이 된다. 하지만 로고스키코일은 이러 한 기존 CT의 단점을 보완하여 광범위한 전류대역의 측 정을 가능하게 한다. 본 논문에서는 고주파 대전류 측정 용으로 사용되는 무철심 코일 전류센서인 로고스키 코일 을 이용하여 부분방전신호를 검출하고 부분방전 측정기 로서 로고스키 코일의 성능을 검토하고 이의 적용을 통 하여 타당성을 확인할 것이다.

2. 센서설명 및 실험방법

2.1 Rogowski coil 특징 및 원리

배전계통의 전류측정에 있어서 종래에는 CT를 사용하 였지만, 코아의 포화특성으로 인한 오차가 발생이 되어 이로 인해 전류측정의 범위가 제한이 된다. 하지만 로고 스키코일은 이러한 기존 CT의 단점을 보완하여 광범위 한 전류대역의 측정을 가능하게 하였다. Rogowski coil 은 자속밀도를 측정하기 위한 센서로 주로 사용되었지만 현재는 광범위한 대전류 측정용 센서로 새롭게 주목받고 있다. 본 코일은 Faraday-Lenz의 전자유도법칙에 따 라 피측정 전류에 의해 발생된 자속이 코일에는 쇄교량

변화로 유도되는 기전력을 측정하여 전류를 간접측정하 는 것이다. 또한 CT와는 달리 2차측이 사용중에 개방되 어도 과전압이 유기가 되지 않아 보다 안전하다. 특히 구조가 간단하여 생산원가가 저렴한 장점도 있어서 대전 류 방전장치, 고온 플라즈마 발생장치 및 고속 스위칭 전력전자회로 등에서 전류 측정센서로서 많이 이용되고 있다. 그러나 주파수에 따른 임피던스특성에 따라 측정 전류의 주파수가 제한되며, 특히 저전류 측정시 코일에 유기되는 전압이 적기 때문에 특별한 구조 설계가 필요 한 단점이 있다.

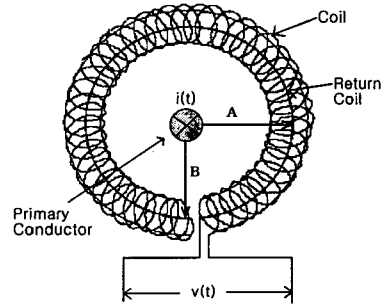


Fig 1. The structure of Rogowski coil

코일에 유기되는 전압은 다음식에 의하여 정의된다.

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

Φ_j 는 j 번째권선에 대한 순시 자속이고, $v(t)$ 는 코일 출력전압이다. Coil에서의 총자속은 다음의 식으로 주어 진다.

$$\Phi = \oint_l dl \int_{S_0} \vec{H} \cdot d\vec{S} = \mu_0 n S I \quad (2)$$

Φ 는 총자속 그리고 l 은 Core의 길이, n 은 권선밀도 (단위길이당 권선), S 는 Core의 단면적 그리고 H 는 자계의 세기이며 I 는 입력전류이다.

만약 Core가 일정한 단면적을 가지고 그리고 Wire가 일정한 밀도로 중앙선 l 에 수직인 권선 이라면

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

이 된다. μ_0 는 공기의 투자율이고 $i(t)$ 는 1차측 전류, M 은 코일의 상호 인덕턴스이다. 위의 식에서 알 수 있 듯이 출력전압은 측정 전류의 변화율에 비례한다.

Rogowski coil은 대전류가 흐르는 도체 가까이에서 있을 수 있는 외부 자계의 영향을 줄이기 위하여 Coil과 전기적으로 반대방향으로 연결된 2번째 와이어 루프가 설계되어야만 한다. 이것을 return coil이라고 하며, Rogowski coil의 루프 바깥에서 나오는 모든 전계를 상쇄시키는 역할을 할 것이다. 이러한 return coil은

Fig 1에서 보여지는 것과 같이 권선의 중앙을 통하는 Wire를 되돌리거나 이미 Wire가 있는 것에 반대방향으로 부가적인 권선을 Winding 하므로서 형성될 수 있다

2.2 Rogowski coil의 등가회로



Fig 2. Equivalent circuit of Rogowski coil

Fig 2는 Rogowski coil의 등가회로를 나타내고 있다. 사용된 등가회로정수 R, L, C의 값은 임피던스 분석기(HP4194A, 100Hz-40MHz)를 사용하여 $R=4.8409 \Omega$, $L=573.227nH$, $C=312.086pF$ 과 같이 얻을 수 있었다.

2.3 실험방법

부분방전의 발생은 침대 평판전극 구조에서 모의적으로 실험을 하였다. 모의 Chamber는 아크릴로 제작되어 밀폐를 시킨 후 측정을 하였다. 다음의 Fig. 3은 본 실험에서 사용하였던 방전 발생원의 전극구조를 나타내고 있다. 전극간 간격은 10mm로 하였으며, 전극의 재질은 스테인리스스틸로 제작하여 실험을 하였다. Table 1은 실험에 사용하였던 실험기구에 대한 사양 및 Sensor의 사양을 보여주고 있다. 평판전극 모서리에서의 부분방전을 막기 위하여 모서리부분을 가능한한 원형을 유지하게 제작하였다.

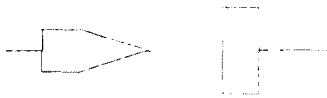


Fig 3. Middle-plane electrode structure

Used equipment	Maker and specification
PD detector	Biddle, 20-300kHz
Oscilloscope	Tektronix, 620A, 5GHz
Rogowski coil 검토사항	로고스키코일 반지름 R_0 코일 단면의 반지름 - 사용된 에나멜선의 직경 - 감은 권수

Table 1. Used equipment maker and specification

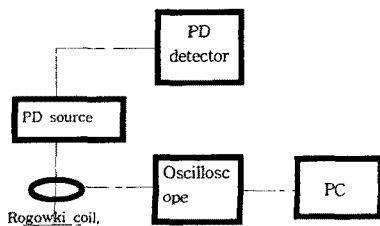


Fig 4. Diagram of experiment equipment

Fig 4는 실험장치의 Block diagram을 나타내고 있으며, 측정은 실온상태에서 행하여졌다. 부분방전 발생시 Rogowski coil이 검출한 신호와 비교를 위하여 고전적인 방법인 부분방전측정기(PD Detector : Biddle)를 사용하였다. 이는 Rogowski coil이 부분방전 측정기로서 사용이 가능한지에 대한 타당성 여부를 조사하기 위한 것이다. Rogowski coil은 적분기를 연결하지 않은 상태에서 측정을 하였으며, 실험 시에 Rogowski Coil의 측정오차를 줄이기 위하여 가능한 중앙으로 접지선이 관통하도록 하였다. 외부 전자기노이즈를 줄이기 위하여 Twist wire를 사용하여 오실로스코프의 프로브에 연결하였다. 측정은 전압이 인가된 후 1분 이내에 측정이 이루어졌다. 직접적인 방전원의 발생에 의한 PD Pulses의 검출에 앞서 모의적으로 Rogowski coil에 구형파 펄스를 인가하여 그때에 나타나는 Rogowski coil의 응답특성 및 인가전류에 따른 출력 전압의 특성을 검토 후 실험하였다.

3. 실험결과 및 고찰

우선적으로 Rogowski coil의 입력펄스에 대한 출력의 특성을 파악하기 위하여 모의적으로 Universal source와 High speed amplifier를 사용하여 구형펄스를 증폭한 후 R과 C를 통해 전류 펄스를 인가하는 방법을 사용하여 Rogowski coil의 출력을 실험하였다. Fig 5(a) (b), Fig 6의 실험 결과그래프에서도 알 수 있듯이 로고스키코일의 출력전압은 입력전류에 대해 상당히 비례적이며, 출력전압의 크기는 입력전류의 상승시간에 상당히 영향을 받는 것으로 나타났다. Fig 5 (a), (b)는 입력전류가 0.17A인 경우와 0.167A인 경우를 비교하여 놓은 것이다. 그래프에서 입력전류펄스가 0.17A인 경우의 상승시간(Rising time, t_r)이 $0.7\mu s$ 이고 출력전압은 0.23V로 나타났다. 입력전류가 0.167A인 경우의 상승시간은 $0.4\mu s$ 이고 출력전압은 0.37V로 나타났다. 이 두 경우에서 알 수 있듯이 Rogowski coil의 출력전압은 관계이론에서도 설명하였듯이 전류의 시간 변화율 di/dt 에 의해 결정됨을 알 수 있다. 인가된 전류펄스의 크기는 (a)의 경우가 상대적으로 크지만 상승시간은 오히려 빠르게 나타나므로 Rogowski coil의 출력에 대한 크기가 상이하게 나타나게 되는 것이다.

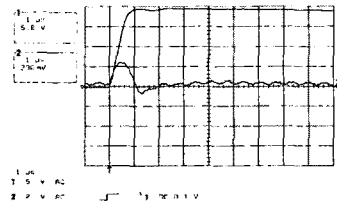


Fig 5(a). $I_{in}=0.17A$,
 $t_r=0.7\mu s$ (simulated result)

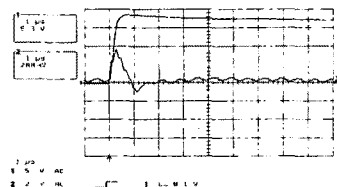


Fig 5(b). $I_{in}=0.167A$,
 $t_r=0.4\mu s$ (simulated result)

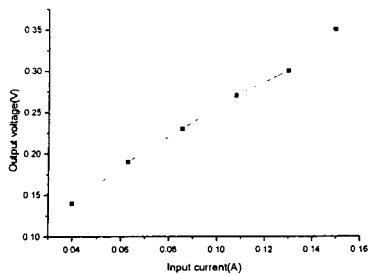


Fig 6. Output voltage of Rogowski coil according to input current

Fig 6은 입력전류에 대한 출력전압의 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 결과는 상당히 선형적으로 나타난다. 이는 로고스키코일의 펄스에 대한 출력이 입력에 비례적인 상수(대략 0.89×10^{-6})를 가지고 있다는 것을 나타내준다. 이런 결과로 볼 때 로고스키코일은 단시간 펄스성인 부분방전의 측정을 하는데 적당한 검출기라고 판단 할 수 있다. 이런 모의 실험결과를 토대로 방전원이 최대 평판이고 인가전압이 8kV인 경우의 실제 부분방전 검출결과를 Fig 6 및 Fig 7 (a), (b)에 나타내었다. 로고스키코일에 대한 방전양상을 분석하기 위하여 High Coupling Capacitor를 갖는 고전적인 PD Detector의 파형과 비교하였다. PD Detector파형의 주파수 대역이 20-30kHz로 나타나고 있으므로, Rogowski coil의 신호파형을 관측하는 샘플링 주파수보다 낮은 샘플링 주파수에서 관측이 가능하다. Fig.7은 PD Detector와 Rogowski coil과의 파형을 비교하기 위하여 보다 낮은 샘플링 주파수에서 각각의 신호를 비교한 것이다.

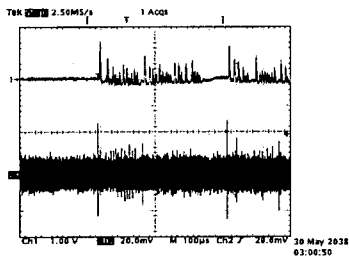


Fig 7. Comparison of two waveforms measured at Low sampling rate under experiment(Upper side: PD detector signal, Lower side: Rogowski coil signal)

Fig 7의 (b),(c)는 전극간격 10mm 인가전압 8.0kV에서의 Rogowski coil의 검출신호와 이에 대한 FFT 분석을 한 결과를 보여주고 있다. 빠른 펄스성의 입력신호를 검출한 출력신호를 보다 자세히 살피기 위하여 각각의 신호측정 시 Time scale을 200ns/div로서 설정하였으며 그때의 샘플링 주파수는 2.5Gs/s이다. 실험결과 외부 Noise에 대한 영향이 상당히 작음을 하였으며, 출력신호가 미약하면 외부 Noise에 의해 Rogowski coil의 출력파형이 묻혀 버리는 현상이 초래되었다. 따라서 그에 대한 대책으로 필터 등을 사용하여 Noise의 영향을 줄이는 것도 또 다른 과제이기도 하다. 또한 로고스키 코일은 2차측의 출력전압이 매우 작기 때문에 증폭기 등을 사용하여 출력신호를 측정할 필요가 있다.

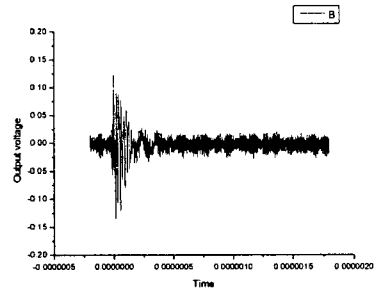


Fig 8(a) Waveform of Rogowski coil under experiment

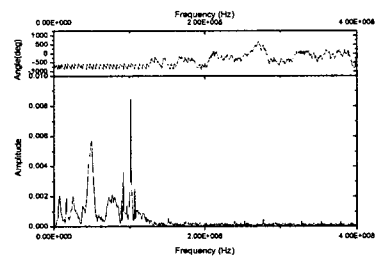


Fig 8 (b) FFT Analysis of Rogowski coil waveform of Fig 8 (a)

3. 결론

본 논문에서는 Rogowski coil이 부분방전 측정기로서 사용이 가능한지에 대한 여부를 고전적인 PD Detector와 비교·검토하여 PD Pulse sensor로서의 사용가능 여부에 대한 가능성을 판단하고, Rogowski coil의 장점을 부각시킬 수 있도록 하는데 또 다른 목적이 있었다. 모의 실험과 최대 평판 전극 구조에서의 실제 부분방전시의 실험결과로 볼 때 Rogowski coil은 부분방전에 대해 빠른 응답성을 나타내고 있다. 또한 Rogowski coil의 출력은 전류의 시간 변화율인 di/dt에 따라 비례적으로 변화하였다. 이런 점으로 미루어 볼 때 Rogowski coil은 부분방전 검출기로서 충분한 가능성이 있다고 사료된다. 하지만 출력신호의 미약함으로 인해 작은 펄스 전류가 인가될 경우에는 부분방전의 검출이 어려운 단점도 있다. 앞으로 Noise 영향의 감소 및 PD Pattern에 대한 Wavelet 혹은 Fractal theory에 의한 알고리즘화를 시키는 것이 연구 수행 해야할 과제이다.

【참고 문헌】

- [1] F. H. Kreuger, "Partial Discharge Detection in High Voltage Equipment", Temple Press, 1989
- [2] N. G. Trich, "Partial discharge : Discharge in air part 1 : physical mechanisms", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 11, No.2, pp 23 - 29,1995
- [3] C. Mayoux and C. Laurent, "Contribution of Partial Discharges to Electrical Breakdown of Solid Insulating Materials" IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2 No.4 pp 641 - 652, 1995
- [4] C. Neumann and V.Rees, "Non-conventional UHF sensors for PD measurement on GIS of different designs", 2000
- [5] Md. Enamul Haque, et "Application of Acoustic Sensing and Signal Processing for PD Detection in GIS