

# 초광대역수신기와 로고스키코일을 이용한 부분방전 감지방법

중신회원 최 규 남\*

## Partial Discharge Sensing Method using Ultra-wide Bandwidth Receiver and Rogowski Coil

Kyoo Nam Choi\* *Lifelong Member*

### 요 약

본 논문에서는 고전압 전력기기의 부분방전 신호를 비접촉식으로 감지할 수 있는 방법에 대하여 제안한다. 기존의 극초단파 무선수신방식은 감도가 약하여 부정확하고 콘덴서결합방식은 고전압선로에 위험하게 직접 접촉하여야 하는 단점이 있었다. 제안하는 로고스키 코일을 이용한 부분방전 감지 센서는 초광대역 수신기를 사용한 신호 적분방식을 도입하여 미약한 부분방전 고주파 신호를 주변 잡음의 영향을 받지 않고 감지할 수 있었다. 6.6kV 고전압전동기 감시용으로 시작된 초광대역 수신기와 로고스키 코일을 이용한 부분방전 감지 센서는 90A 상용주파수 전류에서도 부분방전 신호인 10mA의 고주파 연면방전 전류를 감지할 수 있음을 보여주었다. 제안된 감지방식은 비접촉식 유선 방식이므로 고감도와 안전성을 확보할 수 있는 장점이 있다.

**Key Words** : discharge sensor, partial discharge, UWB sensor, rogowski coil sensor.

### ABSTRACT

In this paper, we propose non-contact sensing method of partial discharge signal from high voltage equipment. The conventional wireless sensing method using ultra-high frequency or condenser coupling method had shortcoming because of weak signal strength or risk of direct contact to high voltage line. The proposed partial discharge sensing method utilizing Rogowski coil was able to sense high frequency signal from partial discharge without being effected by environmental noise using ultra-wide bandwidth receiver and signal integration method. The experimental partial discharge monitoring sensor for monitoring 6.6kV high voltage motor using ultra-wide bandwidth receiver and Rogowski coil showed possibility to sense high frequency component of 10mA surface discharge current from 90A current having commercial frequency. Proposed sensing method has the merit of both high sensitivity and safety because it is inherently non-contact wired monitoring method.

### I. 서 론

전력설비 용량의 증가와 기술의 진보에 따라 터빈발전기, 수차발전기, 대형전동기 등의 회전기가 대용량화, 고전압화, 소형 경량화 됨에 따라 절연

고장 예방을 위한 절연열화 진단이 중요시 되고 있다. 이들 회전기 고장의 대부분은 권선 소손이며 절연체 중에서 가장 중요한 부분인 고정자 전기자 권선의 절연 고장은 복구하는데 장시간이 요구되므로 회전기의 고장을 미연에 발견하고 불시정지에 따른

\* 인천대학교 정보통신공학과 (knchoi@incheon.ac.kr)

논문번호 : 12005-0218, 접수일자 : 2012년 2월 18일, 수정일자 : 2012년 4월 23, 게재확정일자 : 2012년 4월 24일

과급을 막기 위한 상시감시 시스템이 요구되었다. 고정자 권선에 고전압이 인가될 때 절연재료 내부에 있는 공극에서 부분방전이 발생되므로 부분방전은 절연재료의 열화정도를 판정하는 데에 중요한 요소가 된다. 따라서 운전 중 회전기의 고정자 권선에서 부분방전을 감지하기 위한 권선의 절연진단을 수행하여 회전기의 신뢰성을 확보할 필요가 있었다.

부분방전 신호를 감지하기 위하여 전력선 주변 전자파를 감지하여 전력기기의 부분방전을 검출하는 방법이 시도 되었으나<sup>[1-2]</sup> 신호강도가 약하여 부분방전 신호를 효과적으로 수신하는데 어려움이 있었다. 몰드변압기의 고압 측에 부분방전 측정용 고압세라믹 센서로 부분방전을 측정하는 방법도<sup>[3-5]</sup> 시도된 바 있으나 고전압 선로에 직접 접촉하여야 하는 관계로 안정성에 문제가 있었다. 첫번째 시도와 유사한 방법의 폐쇄배전반 및 가스절연 개폐장치에서 발생하는 방사 전자파를 비교분석하여 부분방전을 검출하려는 시도<sup>[6]</sup>가 있었으나 역시 약한 신호입력으로 주변 잡음에 약한 단점이 있었다. 또한 로고스키 코일을 사용한 부분방전 신호 검출법에 대해 컴퓨터 시뮬레이션 기법을 이용한 시도<sup>[7]</sup> 있었으나 실제 시스템에의 적용은 하지 못하였다.

본 논문에서 제시하는 초광대역 수신기를 이용한 신호적분방법과 로고스키 코일을 이용한 부분방전 감지 센서 방식은 광대역 수신기만을 사용하는 경우에 비해 비접촉식이면서 고감도로 구현이 가능하며 상대적으로 주변 전자파의 영향을 적게 받으며 안전하게 신뢰성 있는 부분방전 감지를 할 수 있는 장점이 있다.

본 논문의 구성은 2장에서는 부분방전 감지 방법에 대하여, 3장에서는 부분방전 감지 시스템에 대한 실험에 대하여 기술하고, 끝으로 4장에서 결론으로 맺는다.

## II. 부분방전 감지 방법

부분방전을 검출하기 위한 극초단파(UHF)를 사용하거나 초음파를 사용하는 방법은 신호가 미약하고, 고압 단자에서 결합임피던스를 통한 검출법은 설치가 어렵고 사용이 제한되는 단점이 있다. 이러한 부분방전을 측정하는 방법은 IEC60270에 따라 그림 1과 같은 회로를 사용할 수 있다. 아래 그림에서 U는 교류전원을, Z는 차단임피던스를, Ck는 결합콘덴서를, Zm은 측정임피던스를, M은 측정계 측기를, Ca는 시험대상 물체를 각각 나타낸다. 차

단임피던스 Z가 작아지면 시험대상 물체 Ca에 절연과급이 일어나고 측정임피던스 Zm에 결합콘덴서 Ck를 통하여 걸리는 전압이 상승하게 되어 측정계 측기 M에 높은 입력전압이 가해지게 된다.

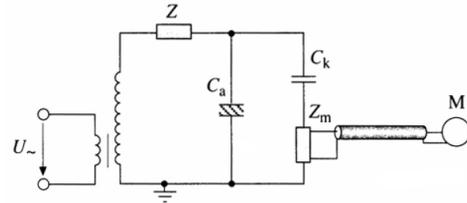


그림 1. 부분방전 측정회로

로고스키 코일을 사용한 검출법은 상호인덕턴스를 이용하여 부분방전 전류를 검출하는 방식으로 고전압 기기에 전력을 공급하는 1차측 전선에 흐르는 부하전류에 급격한 시간적인 변화가 발생하면 2차 측인 로고스키 코일에 유도되어 나타나는 신호 변화를 검출하는 방식이다. 로고스키 코일은 일반 전류변압기(CT)와 달리 공심이므로 포화되지 않고 넓은 주파수 대역에 걸쳐 대전류까지 선형적으로 측정할 수 특징이 있다. 그러나 코일의 인출선은 상용주파수에 최적화 되어 있으므로 가급적 짧게 해야 전송손실을 최소화 할 수 있다.

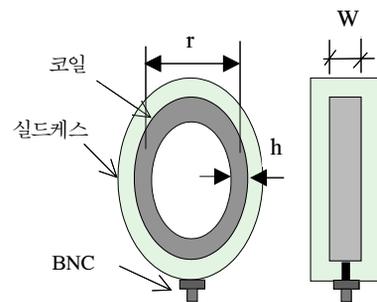


그림 2. 로고스키 코일 모형

로고스키 코일은 그림 2와 같이 외부전파 유입을 방지하기 위한 실드케스 내부에 위치한 PVC 코일 지지대 코어에 코일을 감는 구조로 되어 있다. 그림에서 r는 코일의 평균내경, h는 코일의 수직폭, W는 코일의 수평폭을 나타낸다. 로고스키 코일에 전력을 삽입하면 아래 그림 3과 같은 모델로 나타낼 수 있다. 여기서 R은 로고스키 코일로 부터의 신호를 수신하는 증폭기의 입력저항, ZL은 전력선의 부하저항을 각각 나타낸다.

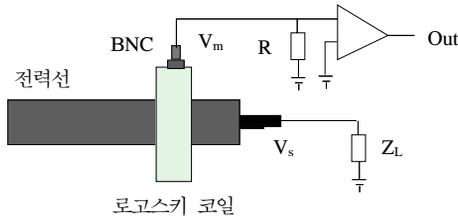


그림 3. 전력선에 로고스키 코일 장착 개념도

전력선의 길이를  $L$ , 전파상수를  $\gamma$ , 선로임피던스를  $Z$ 라 하면 전력선의 전달함수는 아래 ABCD 행렬로 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다<sup>8)</sup>.

$$\begin{bmatrix} V_T \\ I_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{Cosh}(\gamma L) & Z\text{Sinh}(\gamma L) \\ \frac{1}{Z}\text{Sinh}(\gamma L) & \text{Cosh}(\gamma L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} \quad (1)$$

전력선에 흐르는 전류  $I_s$ 는 전원전압이  $V_s$  라면  $I_s = V_s/Z_L$  과 같이 나타내어지며, 전력선의 전류가 유도되는 로고스키 코일에서의 선로방정식은 다음 식 (2)와 같이 나타내어진다. 아래 식에서  $Z_R$ 은 로고스키 코일의 임피던스,  $M$ 은 전력선과 로고스키 코일간의 상호인덕턴스,  $C$ 는 전력선의 실드선과 로고스키 코일간의 분포용량을 각각 나타낸다.

$$\begin{aligned} \frac{dV(x)}{dx} &= -Z_R I(x) + j\omega MI \\ \frac{dI(x)}{dx} &= -j\omega CV(x) \end{aligned} \quad (2)$$

로고스키 코일의 권선길이가  $L_R$  라면 로고스키 코일에서의 출력전압  $V_m$ 은  $V(x=L_R)$  과 같고, 로고스키 코일의 전달함수  $G_R = V_m/V_s$ 은 시간에 따라 변화하는 고조파들의 합으로 다음 식 3과 같이 나타내어진다. 여기서  $\gamma_R$ 은 로고스키 코일의 전파상수를,  $Z_o$ 는 파동임피던스를 각각 나타낸다.

$$G = \frac{j\omega MRZ_o \text{Sinh}(\gamma_R L_R)}{Z_L Z_R (Z_o \text{Sinh}(\gamma_R L_R) + R \text{Cosh}(\gamma_R L_R))} \quad (3)$$

로고스키 코일은 일반적인 토로이드 코일과 같으므로 개략적인 자기인덕턴스는 일반적으로 식 (4)와 같이 나타내어진다. 여기서  $N$ 은 권선회수,  $A = Wh$ 는 토로이드 코일의 단면적을 나타낸다.

$$L_s \approx \frac{\mu_o N^2 A}{2\pi r} \quad (4)$$

로고스키 코일은 권선 상호간 및 차폐판 간에 누설 자속이 존재하므로 실제 자기인덕턴스는 실측하여 결정한다.

### III. 부분방전 감지 시스템

부분방전 감지시스템의 구성은 신호를 수신하는 로고스키 코일과 불필요한 외부 잡음을 제거하는 필터부와 필요한 부분방전 신호를 수신하는 증폭부, 이들 신호로부터 경보수위를 판단하여 경보를 발생시키는 마이크로프로세서로 구성된 신호처리부로 나누어진다.

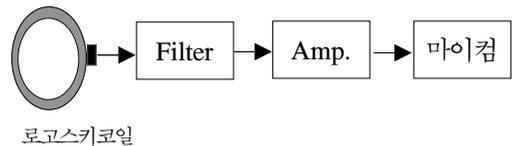


그림 4. 부분방전 감지 시스템의 구성도

실험에 사용된 로고스키 코일은 선로의 부하전류와 부분방전전류를 모두 측정하기 위하여 외경 69mm, 내경 55mm,  $A=0.3\text{cm}^2$ ,  $L_s=1\text{mH}$  인 상용주파수 전류 측정용 로고스키 코일을 사용하였다. 상용주파수용 로고스키 코일은 주변 전파 수신감도가 높으므로 이를 제거하기 위하여 필터부는 차단주파수가 400kHz, 3MHz, 10MHz인 고역통과필터를 각각 사용하여 신호를 측정하였다. 그림 5에 실험에 사용된 차폐용 실드케스를 제거한 로고스키 코일을 나타내었고, 그림 6에 고역통과필터부와 증폭부가 결합된 보드의 사진을 나타내었다.



그림 5. 로고스키 코일의 사진

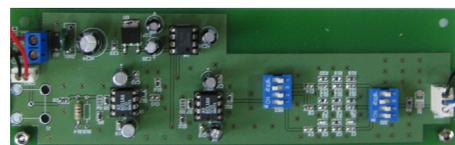


그림 6. 필터부와 증폭부 사진

각기 다른 차단주파수 특성을 갖는 필터부를 사용한 로고스키 코일의 측정된 전달함수 특성을 그림 7, 8, 9 에 각각 나타내었다.

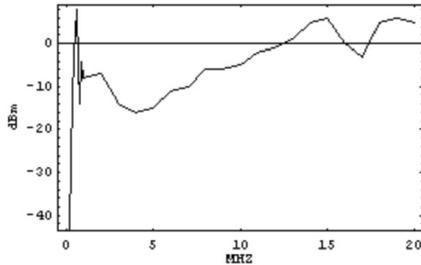


그림 7.  $f_c=400\text{kHz}$  에서의 로고스키 코일 출력특성

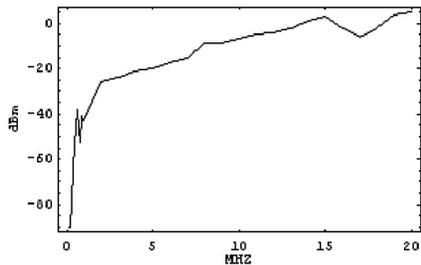


그림 8.  $f_c=3\text{MHz}$  에서의 로고스키 코일 출력특성

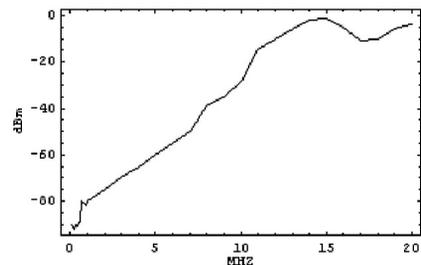


그림 9.  $f_c=10\text{MHz}$  에서의 로고스키 코일 출력특성

400kHz 차단 특성에서는 저역에서 스파이크 가 보이지만 3MHz 이상 차단 특성에서는 안정된 주파수 특성을 보임을 알 수 있다. 그러나 20MHz 이상에서는 급격한 출력전압 저하를 나타내었다. 이는 고주파변류기(HFCT)가 아닌 상용주파수 전류측정용 로고스키 코일도 20MHz 이하 주파수 대역에서는 부분방전 신호 모니터링용으로 사용할 수 있음을 보여주고 있다.

전력선의 주파수인 60Hz 대역 잡음 영향 정도를 측정하기 위하여 주파수가 1/10로 저하될 때의 필터의 감쇠 특성을 측정하였다. 차단주파수가 10MHz 인 고역통과필터에 주파수가 1MHz 이고 입력이 -10dBm인 신호를 인가할 때 -60dBm이 출

력되어 약 -50dB의 감쇠특성을 나타내었다. 이는 이보다 4 디케이드 아래인 상용주파수에 대해서는 충분한 저지가 가능함을 보여주고 있다. 그림 10에 1MHz 신호 인가시 필터증폭부의 출력전압 신호 스펙트럼을 나타내었다.

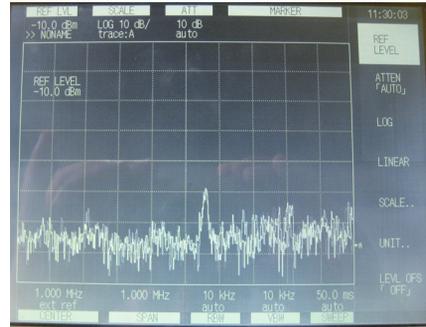


그림 10. 1MHz 신호의  $f_c=10\text{MHz}$  필터 통과후 출력특성

부분방전을 일으키는 코로나 방전은 펄스폭이 수 백 kHz에서 수 GHz에 이르는 광범위한 스펙트럼을 발생시키고, 초기 상태의 방전 에너지는 수 pC 정도이며 수 mA 정도의 미약한 랜덤 전류파형이지만 수개월에 걸친 누적된 절연 열화는 기기에 커다란 손상을 가져오게 된다.

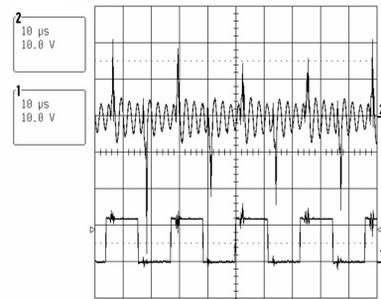


그림 11. 코로나 방전시의 구동전압/전류 파형

부분방전을 시뮬레이션 하기 위하여 46kHz 구형파로 코로나 방전을 인위적으로 발생시켜 측정에 사용하였다. 위 그림 11에서 하단 파형은 구동전압 파형을 나타내고 상단은 구동전류를 나타내었다. 코로나 방전이 일어나는 전압파형과 전류파형에 스파이크가 발생함을 알 수 있다.

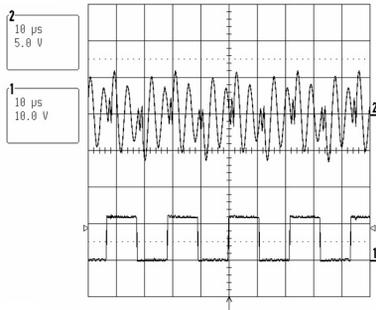


그림 12. 코로나 방전 전 구동전압/전류 파형

비교를 위하여 그림 12에 동일한 조건에서 코로나 방전 전 구동전압과 구동전류 파형을 나타내었다. 코로나 방전이 일어나기 전에는 전압파형과 전류파형에 스파이크가 발생하지 않음을 알 수 있다.



그림 13. 부분방전 감시 화면

제작된 부분방전 감시시스템을 사용하여 부분방전을 상시 모니터링 하는 감시시스템을 구현하여 작동을 확인하였다. 위 그림 13에 4채널에서 부분방전 감시가 가능한 모니터링 디스플레이 화면을 나타내었다.

#### IV. 결 론

상용주파수에서 전력선의 전류감시용으로 사용되는 로고스키 코일을 사용하여 부분방전 감지방법을 시도하였다. 상용주파수용 로고스키 코일은 3MHz 이상의 차단주파수를 갖는 고역통과필터와 같이 사용 시 20MHz 까지 상용주파수 잡음 없이 부분방전 신호를 검출할 수 있음을 보여주었다. -50dB/decade 감쇠특성을 갖는 고역통과 필터는 상용주파수인 60Hz를 충분히 감쇠시킬 수 있었고, 46kHz 의 구형파를 사용한 고전압 코로나 발생기를 사용하여 방전전류가 10mA인 모의 실험에서 상용주파수용 로고스키 코일이 고주파 부분방전 신호

를 수신할 수 있음을 보여주었다. 이는 산업용으로 사용되는 6.6kV 고전압기기의 90A 상용주파수 전류에서도 10mA 의 부분방전 전류인 연면방전 신호를 수신할 수 있음을 나타내는 것이다. 제안된 부분방전 감지 방식은 비접촉식 유선방식이므로 고전압 선로에 혼촉 없이 안전하게 부분방전 신호를 감지할 수 있음을 보여주었다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 박광서, “모의 GIS 내부에 도전성 이물질 존재시 부분방전 진전에 따른 전자파 측정에 의한 절연진단 연구,” 조명전기설비학회논문지, 제22권, 제1호, pp.157-164, 2008.1.
- [2] 광희로 외, “UHF 신호 분석을 통한 모의 GIS 내 부분방전원 측정,” 조명·전기설비학회 논문지, 제18권 제4호, pp.112-117, 2004.7.
- [3] 박찬용 외, “몰드변압기에서 부분방전 검출방법의 비교 분석,” 한국조명전기설비학회 추계 학술대회논문집, pp.301-310, 2008.10.17.
- [4] 임진옥, 장형택, 신판석, “Coupling Capacitor 를 이용한 배전용 몰드변압기 부분방전 계측 모의실험에 관한 연구,” 2010 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템부문회 추계학술대회 논문집, 2010.4, pp.321-323, 2010.4.
- [5] 강동식 외, “몰드변압기에서 부분방전 검출방법의 비교 분석,” 2005 대한전기학회 전기설비전문위원회 추계학술대회 논문집 pp.99-102, 2005.11.25.-26.
- [6] 김광화, “전력용 변압기와 GIS의 부분방전 광역감시 및 지능형 진단기술의 개발,” NRF 특정연구개발사업 최종보고서, 1-0302-00-0094, 한국연구재단.
- [7] 이강원 외, “부분방전 전류측정을 위한 로고스키코일의 적용에 관한 연구,” 한국철도학회 2004년도 추계학술대회 논문집, pp.76-81, 2004.10.
- [8] W. D. Stevenson, “Elements of Power System Analysis,” McGraw-Hill, Tokyo, 1962.

최 규 남 (Kyo Nam Choi)

중신회원



1976년 1월 서울대학교 공과대  
학 졸업

1989년 12월 미국 Texas  
A&M University 전자공학  
과 석사

1992년 8월 미국 Texas A&M  
University 전자공학과 박사

1992년 7월~1994년 8월 LG 전자기술원 연구실장

2000년 8월~2002년 7월 미국 CEMDAS연구소 연  
구원

1994년 8월~2010년 2월 인천전문대학 정보통신과  
교수

2010년 3월~현재 인천대학교 정보통신공학과 교수

<관심분야> 광센서, 광통신