

# 방전신호 검출에 의한 전기화재 예측

길경석\* · 송재용\*\* · 권장우\*\*\*

## Electric Fire Prediction by Detection of Discharge Signal

Gyung-suk Kil\* · Jae-yong Song\*\* · Jang-woo Kwon\*\*\*

### 요약

본 논문은 전기설비로부터 방전신호 검출을 통한 전기화재 예측 기법에 관하여 기술하였다. 방전현상으로부터 전기화재 예측에 필요한 전기적 정보를 얻기 위하여 절연지를 통한 연면 방전, 선간 단락 등 다양한 방전현상을 실험적으로 모의하였다.

실험결과로부터 전기화재 발생시 전원주파수와는 다른 특징적인 주파수 신호가 대부분 차지하는 것을 알 수 있었다. 최종적으로 실험결과에 근거한 방전신호 검출장치를 설계·제작하였으며, 전원선에서 방전신호를 모니터링하는 것으로 전기화재의 예측이 가능함을 확인하였다.

### ABSTRACT

This paper describes a technique that can predict electric fires by detection of discharge voltage signals caused by the use of electric facilities. In the experiment, various discharge modes, a flashover or a surface discharge through insulation paper and a line to line short, were simulated to acquire electrical information for predicting electrical fire as discharge modes.

From the experimental results, it is known that electrical discharges which are ranked as majority causes of electric fires generate characterized signals distinguished from power frequency. Finally, We designed a prototype discharge detector based on the experimental results, and the detector is applied to a power lines. This study showed that the prediction of electric fires is possible by monitoring discharge voltage signals in electric power lines.

### 키워드

electric fires, discharge, flashover, surface discharge, line to line short, frequency spectrum

## 1. 서론

전기에너지는 다른 에너지원에 비해 취급이 용이하고 안전하기 때문에 현대 사회에서 가장 많이 사용되고 있는 에너지원이다. 전기 사용의 편리성으로 공장, 빌딩뿐만 아니라 일반 가정에서도 전기 사용이 급증하여 전기사용에 의한 재해도 해마다 증가하고 있는 실정이다. 통계에 의하면 전기가 원인이 된 화재는 전체 화재 발생건수 중 약

30 [%] 이상을 차지하고 있으며, 연간 수 백억원대에 이르는 막대한 재산피해와 수많은 인명피해가 발생한다고 한다. 그러므로 전기가 원인이 되는 화재를 예측하고 화재발생요소를 사전에 제거하는 기술은 대단히 중요하다.

전기화재는 과전류에 의한 발열과 절연 열화, 순간 단락 등이 원인이 되어 발생하는 화재를 일컫으며, 원인별 발화 현상 중에 대부분이 방전현상이 따르는 것으로 보고되고 있다[1],[2].

\* 한국해양대학교 전기전자공학부 부교수  
접수일자 : 2004. 1. 2

\*\* 한국해양대학교 전기전자공학부 박사과정

\*\*\* 동명정보대학교 컴퓨터공학과 조교수

따라서 전선의 열화나 물리적 손상으로 발생하는 절연파괴가 주위 물체와의 접촉으로 인한 누전 또는 단락사고를 사전에 검출하여 화재로 진행될 수 있는 상황을 파악할 수 있다면 전기로 인한 화재를 현저히 감소시킬 수 있을 것이다.

본 논문에서는 단순히 상용주파수 이상의 고주파 성분을 검출하여 화재예측을 제시하는 기존 연구와는 달리, 실제와 같은 절연파괴 모드의 발생 방법을 제안하고, 실험결과로부터 방전모드별 특정 주파수를 도출함으로써 구체적인 화재예측 알고리즘 개발과 제품의 상용화에 기여할 것이다.

연구 내용으로는 전기가 원인이 되는 화재 발생 이전에 나타나는 방전현상을 모의하고, 그 특성을 분석하기 위하여 연면방전, 단락 등 여러 가지 방전 모드에서의 방전현상을 측정·분석하였으며, 주요 실험내용은 다음과 같다.

전기화재로 진행될 수 있는 상황을 모의하기 위하여 임의 간격의 침전극을 설치하고, 방전이 용이하도록 전원전압 이상의 고전압을 인가하여 간헐적 또는 연속적인 방전을 발생시켰다. 여러 가지 예측 가능한 방전현상을 분석하기 위하여 침전극 사이에 종이, 목재를 삽입하여 이에 대한 방전 신호 특성을 분석하였으며, 선간 단락에 대한 영향을 평가하기 위하여 한류 리액터를 이용한 단락 시험을 병행하였다.

이들 실험에서, 방전에 의해 발생하는 전압, 전류 신호를 검출하고 고속푸리에변환(FFT : Fast Fourier Transformation) 분석을 통하여 상용주파수와 구별되는 방전모드별 주파수 대역을 확인하였으며, 실제 전기화재의 발생을 예측하는 수단으로 사용할 수 있도록 각각의 상황에 따른 주파수 대역을 구분하였다.

본 실험결과로부터 옥내전기설비에 실적용을 위한 검출회로를 설계 제작하여 평가한 결과, 상용교류 전원회로에 포함된 방전신호를 검출하여 전기화재를 예측할 수 있음을 확인하였다.

## II. 실험장치 및 방법

전기화재의 발화 현상 중의 하나인 방전 특성

을 파악하기 위해서 공기 중에서의 절연파괴, 전선의 절연재료로 사용되는 종이와 절연파괴시 목재를 통한 연면 방전, 그리고 선간 단락 시험 등 방전신호가 발생할 수 있는 여러 가지 상황에 따라 특징적인 전압, 전류파형을 측정·분석하였다. 또한 FFT를 이용하여 방전현상별 주파수 스펙트럼을 분석하고, 각각의 상황에 따른 주파수 대역을 결정하였다[3],[4].

그림 1은 방전발생에 의한 전압, 전류의 검출 및 특징적인 주파수 대역을 결정하기 위한 실험장치의 구성을 나타낸 것이다.

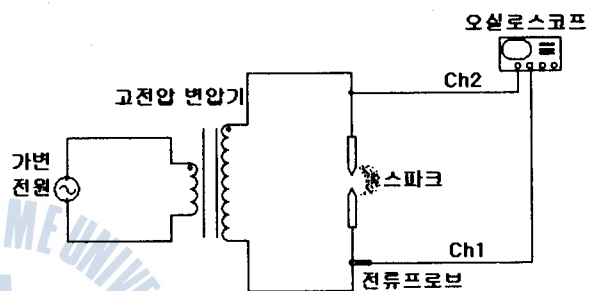


그림 1 절연파괴를 모의하기 위한 실험장치의 구성  
Fig. 1 Configuration of the experimental apparatus for simulating flashovers

방전개시를 위하여 최대 15 [kV]의 2차 출력 전압을 갖는 고전압 변압기와 방전이 용이하도록 3 [mm] 간격에 침전극을 사용하였다.

전압조정기를 통하여 서서히 증가된 1차측 전압은 2차측에 고전압을 발생시키고 방전개시전압 이상이 되면 침전극 부근에서 간헐적 또는 연속적인 방전이 발생한다. 측정된 전압, 전류파형을 오실로스코프의 FFT 기능을 이용하여 전대역에 걸친 주파수별 크기로 변환하였으며, 이를 비교·분석하여, 상용주파수와 구별되는 고주파 대역을 결정하였다.

실제 전기화재에 있어서 발화의 원인이 되는 절연파괴는 전원선의 노화, 파손으로 인한 방전에 의해 발생할 수도 있지만 회로상의 단락(short)에 의하여 발생할 수도 있다. 따라서 이러한 단락현상에 대한 특성을 파악하기 위하여 스위치를 이용한 강제 단락회로를 구성하였으며, 단락시 급격히 증가되는 전류를 제한하기 위하여 한류 리액터를

사용하였다.

그림 2는 단락시험에 대한 측정계를 나타낸 것이다. 스위치를 이용하여 전원전압이 인가된 한류 리액터의 출력을 강제 단락시켜 이 때의 전압, 전류파형을 측정하였으며, FFT에 의한 주파수 분석을 병행하였다.

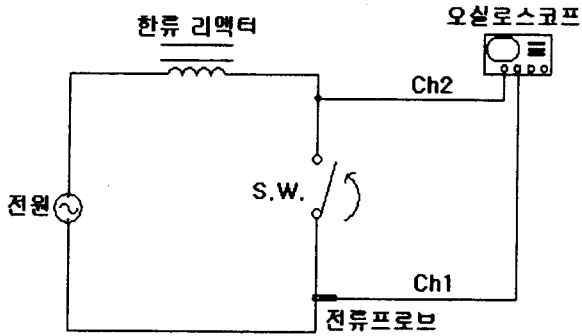
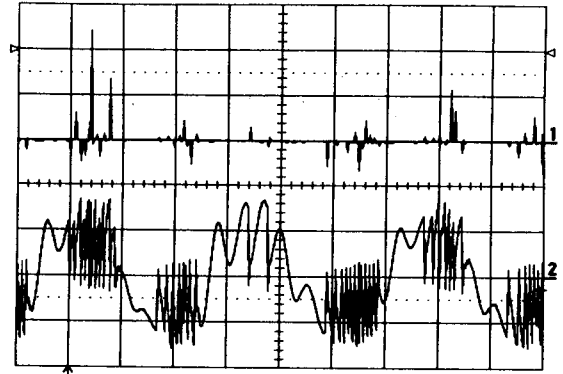


그림 2 단락회로 모의를 위한 실험장치의 구성  
Fig. 2 Configuration of the experimental apparatus for simulating a short circuit

### III. 실험장치 및 방법

전기화재를 예측하기 위해서는 화재의 징후로써 나타날 수 있는 이상신호의 유무를 판단하는 것이 중요하다. 따라서 본 실험에서는 일상생활에서 절연파괴가 발생할 수 있는 각각의 상황을 모의하였으며, 이에 따른 특징적인 신호를 측정·분석하였다.

그림 3은 침전극 양단에 방전이 발생했을 때의 전압, 전류파형을 나타낸 것이다. 약 8[kV] 이상의 고전압이 인가되자 빛과 소리를 수반하는 방전이 발생하였으며, 이 때 방전으로 인한 전류도 함께 검출되었다. 방전시의 전류는 최대 6[A]의 높은 첨두치를 가지며 수 [MHz]의 주파수로 진동·감쇠하는 파형을 나타내었으며, 인가전압의 첨두부분에서는 방전으로 인한 고주파 전압파형이 검출되었다.



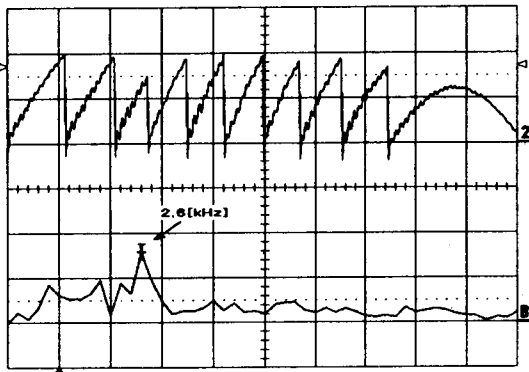
upper : Current [ 2A/div, 5ms/div]  
lower : Voltage [5kV/div, 5ms/div]  
그림 3 침간 절연파괴 모의를 위한 실험장치의 구성  
Fig. 3 Typical waveforms produced by a flashover between needles

그림 4는 방전에 의하여 나타나는 고주파 전압파형과 FFT 분석을 통하여 얻어진 각 주파수별 전압의 크기를 나타낸 것이다.

방전에 의한 고주파 전압은 2.6[kHz] 부근의 주파수 성분이 대부분을 차지하며, 수 차례의 실험을 통하여 대략 1~5[kHz] 대역의 주파수 성분이 우세함을 알 수 있었다.

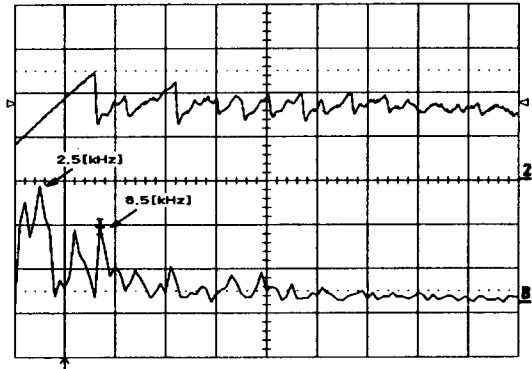
그림 5는 침전극 사이에 젖은 종이를 삽입한 후 고전압을 인가하여 연면방전을 발생시키고, 이 때의 전압파형과 FFT 분석을 통하여 얻어진 각 주파수별 전압의 크기를 나타낸 것이다. 8[kV] 이상의 전압에서 종이의 표면을 따라 연면방전이 발생하였으며, 방전이 지속됨에 따라 방전이 발생한 부분에 부분적인 발화가 진행되면서 점차 방전개시전압이 높아졌다. 또한 FFT 분석에 의하여 얻어진 주파수와 각 주파수별 전압의 크기를 보면 초기에는 다소 높은 주파수 성분이 우세하게 나타나다가 부분적인 발화가 진행되면서 점차 공기 중에서의 방전과 유사한 형태를 보였다.

수 차례의 반복적인 실험을 통하여 12.5[kHz] 부근의 주파수 성분이 대부분을 차지하였고, 젖은 종이를 통하여 연면방전이 발생하였을 때에는 8~15[kHz]의 주파수 성분이 우세함을 알 수 있었다.



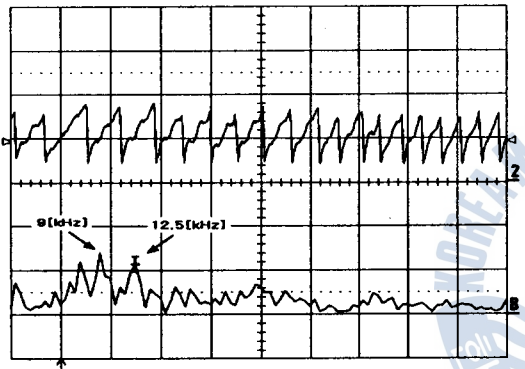
upper : voltage [5kV/div, 0.5ms/div]  
lower : FFT result [1kV/div, 1kHz/div]

그림 4 절연파괴에 의해 발생한 전압파형의 FFT결과  
Fig. 4 FFT result of the voltage waveform produced by a flashover



upper : voltage [1kV/div, 0.2ms/div]  
lower : FFT result [50V/div, 5kHz/div]

그림 6 목재절연파괴에 의해 발생한 전압과 FFT결과  
Fig. 6 Typical voltage waveform produced by a discharge through wood and its FFT result



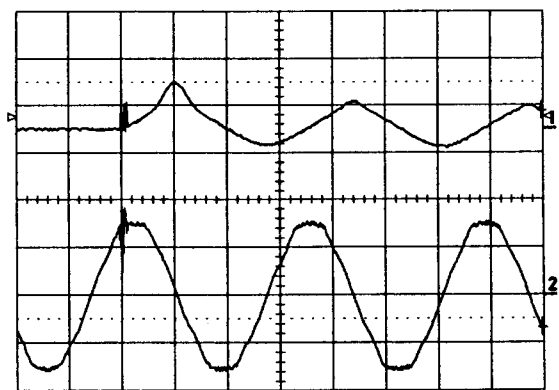
upper : voltage [1kV/div, 0.2ms/div]  
lower : FFT result [100V/div, 5kHz/div]

그림 5 종이절연파괴에 의해 발생한 전압과 FFT결과  
Fig. 5 Typical voltage waveform produced by a discharge through papers and its FFT result

그림 6은 침전극 사이에 젖은 목재를 삽입한 후 인가 전압을 상승시켜 연면방전이 발생했을 때의 전압파형을 나타낸 것이다. 약 1.7 [kV] 이상의 전압에서 목재의 표면을 따라 연면방전이 발생하였으며, 젖은 종이를 이용한 실험과는 달리 방전이 발생하는 부분 이외에서도 빛과 소리를 동반하는 방전이 진행되면서 목재의 곳곳에서 발화가 진행되었다. 또한 초기에는 비교적 낮은 전압에서 방전이 발생하였으나, 방전이 지속되고 목재 곳곳에서 발화가 진행되면서 점차 방전개시전압이 상승하였다. FFT 분석에 의하여 얻어진 주파수와 각 주파수별 전압의 크기를 보면 약 8.5 [kHz] 부근의 주파수 성분이 우세하게 나타났으며 이보다 높은

그림 7은 스위치를 이용하여 회로를 단락시켰을 때 전압, 전류파형을 나타낸 것이다. 스위치를 켤 때 1회의 방전이 발생하였으며 상용주파수와 구별되는 전압, 전류파형이 관찰되었다.

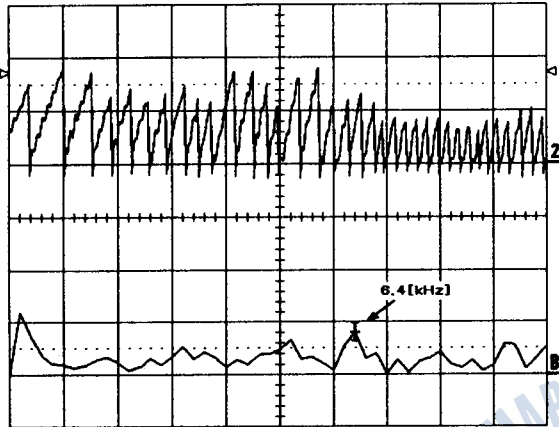
그림 8은 방전으로 인하여 나타나는 전압파형을 FFT 분석을 통하여 각 주파수별 크기로 나타낸 것이다.



upper : current [ 2A/div, 5ms/div]  
lower : voltage [200V/div, 5ms/div]

그림 7 단락에 의해 발생한 전압 전류 파형  
Fig. 7 Typical waveforms produced by a short circuit

방전에 의한 고주파 전압파형의 주파수별 특성을 보면 대략 6.4 [kHz] 부근의 주파수 성분이 대부분을 차지했으며 크기는 작지만 이보다 높은 주파수 성분이 부분적으로 관찰되었다. 수 차례의 반복적인 실험을 통하여 단락시 발생하는 방전전압은 4 ~ 9 [kHz] 대역의 주파수 성분이 우세함을 알 수 있었다.



upper : voltage [100V/div, 0.5ms/div]  
lower : FFT result [50V/div, 1kHz/div]

그림 8 단락에 의해 발생한 파형과 FFT결과  
Fig. 8 Typical voltage waveform produced by a short circuit and its FFT result

본 실험을 통하여 방전에 의한 전압의 특징적인 주파수 대역을 분석하였으며, 이를 표 1에 나타내었다. 방전현상론에서 볼 때, 본 실험과 같은 공기중의 방전주파수는 수 [kHz]에서 수 백 [MHz] 대역의 주파수 성분을 포함하지만, 옥내배선에서의 방전신호는 방사성분이 검출되지 않고 전원선을 통하여 전달되는 전도 성분만을 검출하며 전원선간의 표류정전용량과 인덕턴스로 수십 [kHz] 이상의 고주파 성분은 감쇠하기 때문에 검출되지 않았다[4].

이와 같이 방전시 발생하는 고주파 신호의 검출방법을 이용한다면 전기화재로 진행될 수 있는 상황을 사전에 예측할 수 있을 것이다. 따라서 수 [kHz]의 고주파 방전신호를 검출할 수 있도록 고역통과 필터를 적용한다면 경제성 및 타당성이 있는 전기화재 예측시스템의 구성이 가능할 것이다.

표 1 여러 가지 방전모드의 주파수 대역  
Table 1 Frequency bandwidth on several discharge modes

구분	주파수 대역
공기	1~5 [kHz]
종이	8~15 [kHz]
목재	6~19 [kHz]
단락시험	4~9 [kHz]

#### IV. 검출장치의 설계 및 평가

실험결과로부터 상용전원전압에 포함된 방전전압 신호를 검출하기 위한 장치의 고역통과 주파수는 1~2 [kHz]가 적합함을 알 수 있었으며, 본 특성에 적합한 교류 전원선과의 결합회로와 능동성 필터를 설계하여 그림 9에 나타내었다[5],[6].

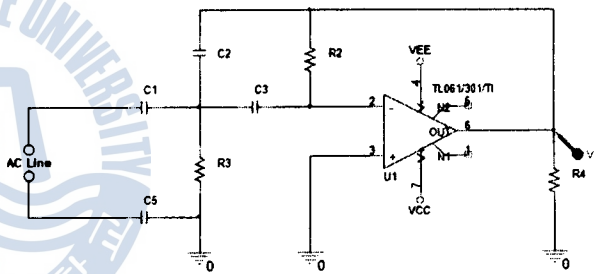


그림 9 방전검출기의 회로  
Fig. 9 Circuit of the discharge detector

상용교류 전원선에서 60 [Hz] 및 기본파의 제15차 고조파까지의 전압성분은 차단시키고 방전 신호만을 검출하도록 차수 2단의 Butterworth 필터를 구성하고 전원선과의 결합은 콘덴서를 사용하였다.

본 회로의 주파수 응답특성은 그림 10에 나타낸 바와 같이 900 [Hz]까지는 60 [dB]로 감쇠시키고 1.5 [kHz]이상의 신호는 감쇠없이 통과하는 특성이므로, 방전이나 단락시 발생하는 신호를 검출하는데 적당한 것으로 판단된다.



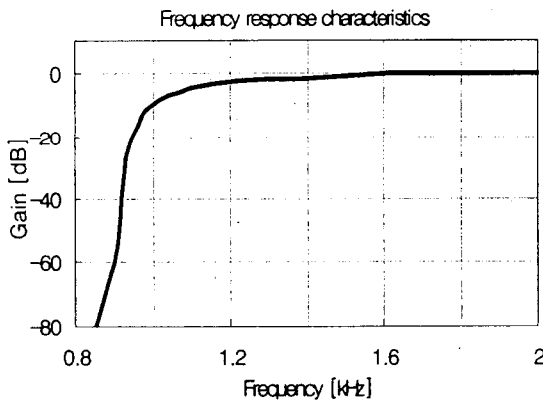


그림 10 방전검출기의 주파수 응답특성  
Fig. 10 Frequency response characteristics of the discharge detector

그림 11은 시제작한 방전검출기를 상용교류 전원회로에 연결시키고 회로내에서 침전극을 이용하여 임의 방전을 시켰을 때 측정된 파형이다.

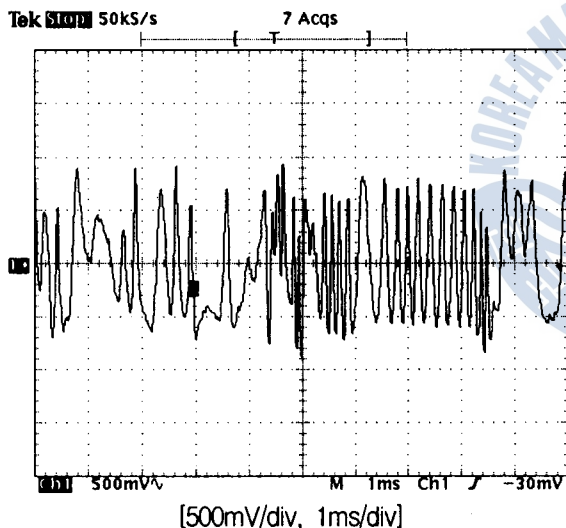


그림 11 절연파괴시 방전검출기에 의해 측정된 파형  
Fig. 11 Typical waveform measured by the detector when a flashover is generated

전원선의 60 [Hz]기본파 및 고조파 성분은 감쇠되고 방전신호만이 검출됨을 알 수 있었다.

## V. 결론

본 연구에서는 옥내전기회로에서 전기에 의한 화재를 예측할 수 있는 방법을 제안하기 위하여,

발화 현상중 상당수를 차지하는 절연파괴시의 방전특성에 대하여 연구하였다. 방전이 발생할 수 있는 여러 가지 상황을 모의하여 상용주파수와 구별되는 방전신호의 주파수 대역을 분석하였으며, 실험결과로부터 전원선에서 방전신호만을 검출하는 장치를 설계·제작하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

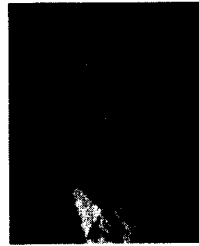
- 1) 교류 15 [kV]의 고압 변압기와 3 [mm] 간격에 침전극을 이용하여 인위적으로 방전을 발생시켰으며, 방전시 전압파형을 분석한 결과, 공기 중 방전은 1 ~ 5 [kHz]의 주파수 성분이 우세하였다.
- 2) 침전극 사이에 종이 또는 목재를 삽입하고 인위적으로 연면 방전을 발생시켰으며, 방전시 전압파형을 분석한 결과, 종이에서는 8 ~ 15 [kHz], 목재에서는 6 ~ 19 [kHz]의 성분을 포함하고 있었다.
- 3) 한류 리액터 이용한 순간 단락 시험에서 단락 순간의 전압파형을 측정하고 분석한 결과, 4 ~ 9 [kHz]의 주파수 성분을 포함하고 있었다.
- 4) 교류 전원선에서 방전 신호만을 검출하기 위한 장치의 주파수 대역은 1 ~ 30 [kHz]가 요구됨을 알 수 있었으며, 이들 신호는 전력선 모델 등 옥내에서 사용되는 주파수 발생기의 특정주파수와 중복되지 않아 실제 적용에 있어서도 문제점이 없다.
- 5) 시제작한 방전신호 검출장치는 옥내전기회로에서 선로 또는 기기의 절연파괴나 단락에 의해 발생하는 방전신호 검출에 충분한 성능이 있음을 확인하였다.

이와 같이 전기화재의 발화원인이 되는 절연파괴시의 방전은 방전형태에 상용주파수와 구별되는 고주파 대역의 신호를 발생시킨다. 그러므로 전기회로의 분전반 등에서 방전 신호를 검출한다면 절연파괴와 단락을 미리 감지하여 화재로 이어질 수 있는 상황에 대처할 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

- [1] 김창중, "전기화재의 분석과 규명", 한국조명·전기설비학회, 제 9권, 제 2호, 1995. 4.
- [2] 월간전기 편집부, 전기사고별의 원인분석과 방지대책, 전우문화사, pp.231~280, 1995.12
- [3] 일본전기학회 편집부, 고전압시험 핸드북, 일본전기학회, pp.353~385, 1983.3
- [4] Dieter Konig, Narayana Rao, Partial Discharges in Electrical Power Apparatus, VDE-VERLAG, pp.151~172, 1993.
- [5] Richard Lee Ozenbaugh, EMI Filter Design, Marcel Dekker Inc., pp.3~22, 1996
- [6] MicroSim, Filter Designer, MicroSim Co., p.120, 1996

권장우(Jang-woo Kwon)



1990.02 : 인하대학교 전자공학과 공학사  
 1992.02 : 인하대학교 전자공학과 공학석사  
 1996.08 : 인하대학교 전자공학과 공학박사  
 1996.10 - 1998.02 : 특허청 심사관  
 1998.03 - 현재 : 동명정보대학교 컴퓨터공학과 조교수  
 ※ 관심분야 : 인공지능, 신호처리, 지능형 시스템

저자 소개



길경석(Gyung-suk Kil)

1984.02 : 인하대학교 전기공학과 공학사  
 1987.08 : 인하대학교 전기공학과 공학석사  
 1996.02 : 인하대학교 전기공학과 공학박사  
 1996.04 - 현재 : 한국해양대학교 전기전자공학부 부교수  
 ※ 관심분야 : 고전압 측정, 피뢰기 열화진단기술, 전력설비 부분방전 검출 기술 등



송재용(Jae-yong Song)

1997.02 : 한국해양대학교 전기공학과 공학사  
 1999.02 : 한국해양대학교 전기공학과 공학석사  
 1999.03 - 현재 : 한국해양대학교 전기공학과 박사과정  
 ※ 관심분야 : 고전압 측정, 피뢰기 열화진단기술, 전력설비 부분방전 검출 기술 등