

An Electrical Installation Failure Signal Detection using Time-Energy Analysis

池昇昱[†] · 李春夏^{*} · 金忠年^{**} · 李廣植^{***} · 沈光烈[§]
 (S. W. Jee · C. H. Lee · Ch. N. Kim · K. S. Lee · K. Y. Sim)

Abstract - Most of electric accidents are happened in the place where activities are frequent by common people who has low electric knowledge. Also, accidents are increased in the low voltage electric equipment. So, it is increased to spread the dispersion or non-utility power generation system. It means that ordinary times observation is required for electric equipments by common people. This paper is studied for the diagnosis method of electric equipment that common people can diagnose easily. Voltage is generally and exactly measured in the electric and electronic field. We suggest new analysis tools using only electric voltage. It is called the Time-Energy analysis.

The Time-Energy analysis is as following

First, divide measured voltage waves into same parts,

Second, conducted FFT(Fast Fourier Transform) transform for each divided period,

Finally, each results are reassembled after graphic treatment.

We compared Time-Energy analysis with discharge form by tracking tester. As the result, tracking discharge processes distinguished clearly.

Keyword : FFT, Time-Energy Analysis, Tracking Breakdown, Tracking Tester

1. 서 론

전기재해 중 상당수가 전기에 관한 지식이 부족한 일반인들의 활동이 많은 곳에서 발생된다. 또한 220[V]나 380[V] 등의 저압 전기 설비에서 사고가 많이 발생되며, 전기 배선에서의 사고가 많다.¹⁾⁻³⁾

시대적으로도 분산형이나 현지설치형 자가발전시스템들의 보급이 확대되고 있다. 이는 일반인들에게도 전기설비에 대한 상시 감시가 요구되고 있음을 의미한다.⁴⁾⁻⁵⁾

따라서, 일반인들도 쉽게 전기설비의 이상 유무를 진단할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다.

전기·전자 측정에서 가장 쉽고 정확하게 측정할 수 있는 것이 전압이다.

본 논문은 전압만으로 전기설비나 기기의 이상 유무를 감지할 수 있는 방법에 대한 것이다. 이를 위해 시간-에너지 분석 방법을 제시하고, 트래킹 현상에 적용해 보았다.

2. 트래킹 진전 과정

트래킹이란 절연물 표면에 부착된 오염 물질 때문에 표면 누설전류가 증가하고, 절연물이 분해하여 도전성 통로가 생기는 현상이다.

일반적으로 습윤 및 오손된 조건하에서의 트래킹 파괴에 이르는 과정은 다음에 의해서 판단된다.

(1) 전해액을 매개로 해서 흐르는 누설전류는 전해액 적하 직후에 일단 상승하여 최대치에 도달한 후 점차적으로 감소하여 최종적으로 거의 0으로 되고 건조대가 형성된다.

(2) 건조대에서 방전이 개시되면 DSO(digital storage oscilloscope) 상의 전류 파형에 고조파성분이 중첩되어 지는 것과 시각적인 관측으로 확인할 수 있다.

(3) 방전이 진전되어 탄화가 개시되면 DSO 상에서 고조파 성분을 포함한 전류 값이 증가한다. 더욱이 이때는, 시료 표면에서 미소발광방전(scintillation)이 일어나는 것을 관찰할 수 있다.

(4) 탄화 도전로가 진전하여 트래킹 파괴에 이르게 되면, 누설전류가 급격히 증가하게 된다.⁶⁾⁻⁸⁾

3. 시간-에너지 변환의 개념

FFT(Fast Fourier Transform)는 시간 영역의 데이터를 주파수 영역의 데이터로 변환하는 과정에서 Parseval의 정

† 교신저자, 正會員 : 嶺南大 電氣工學科 博士
E-mail : skraken@chol.net

* 正會員 : 湖西大 環境安全工學部 教授 · 工博

** 正會員 : (株)인터커넥션 責任研究員

*** 正會員 : 嶺南大 電氣工學科 教授 · 工博

§ 正會員 : 蔚山科學大 電子電子通信學部 教授 · 工博

接受日字 : 2005年 10月 14日

最終完了 : 2005年 12月 5日

리에 의해 에너지를 보존한다. 그림 1의 (a) 시간영역에서 빗금 친 A 부분을 FFT한 것이 (b) 주파수 영역이라고 한다면 A와 B의 에너지는 같게 된다. 또한, (a)에서 period의 시작시간 t_0 에 대해 B의 에너지를 값(C의 길이=B의 에너지)으로 하는 그래프를 그리게 되면 (c)와 같은 시간영역의 값을 얻을 수 있다.

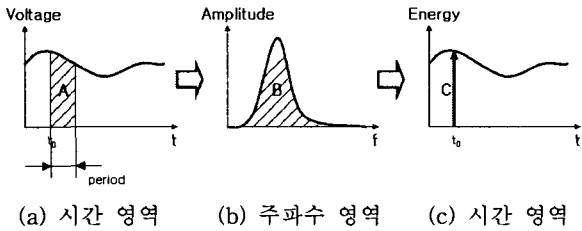


그림 1. 시간-에너지 분석의 개략도 I
Fig. 1 Schematic diagram I of time-energy analysis

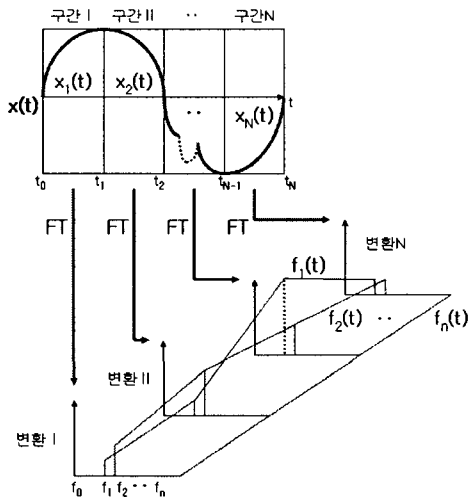


그림 2. 시간-에너지 분석의 개략도 II
Fig. 2 Schematic diagram II of time-energy analysis

시간-에너지 분석의 개략도인 그림 2에서 원래의 파형 $x(t)$ 를 동일한 해상도와 크기(구간 I, 구간 II, ..., 구간 N)로 나누고, 각 구간별로 푸리에 변환을 수행한 결과가 변환 I, 변환 II, ..., 변환 N이다. 각 변환에서 주파수 값들이 동일하고 시간 영역과 주파수 영역에서 에너지가 동일하므로 $x(t)$ 의 에너지는 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$X_E(t) = \sum_{k=0}^n f_k(t) \quad (1)$$

그림 2에서 각 구간들의 시작점 $t_0, t_1, t_2, \dots, t_{N-1}$ 을 시간축으로 하고, 식 (1)로 구한 값을 에너지 축으로 하여 그래프

를 그리게 되면 그림 1의 (c)와 같이 다시 시간영역으로 변환이 가능하다.

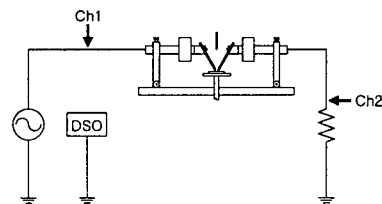
본 논문에서는, 식 (2)과 같이 식 (1)에서 필요한 주파수 성분들 만의 크기를 합하여 시간영역으로 변환하는 방법을 새롭게 제시하고자 하며 이를 시간-에너지변환이라 명한다.

$$X'_E(t) = \sum_{k=1,2,3,\dots,m} f_k(t) \quad (2)$$

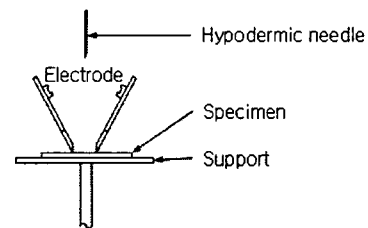
4. 실험 장치 및 방법

트래킹 시험은 IEC 60112 "Method for determining the comparative and the proof tracking indices of solid insulating materials under moist conditions"에서 규정한 시험장치와 방법으로 진행되었다.⁹⁾ 인가 전압은 교류 380[V], 60[Hz]로 하였으며, 시료는 크기 6×6[cm], 두께 3[mm]의 PVC(PolyVinyl Chloride)를 사용하였다.

전체적인 실험회로는 그림 3과 같이 구성하였으며, 전압·전류파형을 얻기 위해서 LeCroy DSO Waverunner LT372(4GS/s)와 100:1(LeCroy, PPE 2[kV]) 프로브를 이용하였다.



(a) 실험회로



(b) 전극 배치도

그림 3. 실험회로 및 전극 배치도
Fig. 3 Experimental circuit and arrangement of electrodes

5. 실험 결과 및 고찰

전극에 전압이 인가되고 전해액이 적하되기 시작하면서부터 트래킹 파괴가 일어나기까지 모두 6단계로 나누고 그 각각의 경우에 대한 전압·전류 파형을 그림 4에 나타냈다. 시간 해상도 5[ms/div], 데이터 수는 50,000개로서 샘플링 타입은 1[MHz]이다.

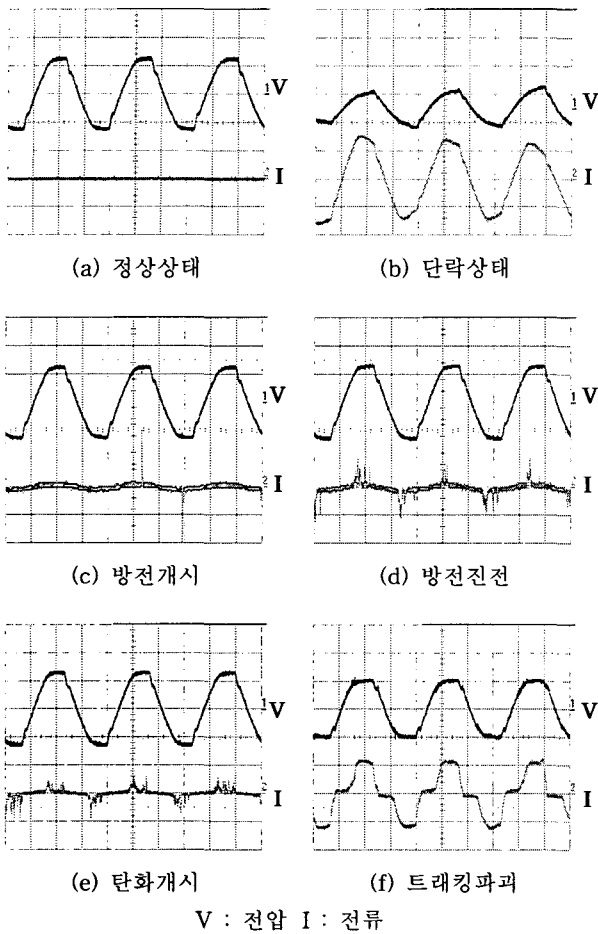


그림 4. 전압·전류파형
Fig. 4 Waveform of voltage and current

그림 4에서 (a)는 정상상태, (b)는 적하된 전해액에 의해 양 전극 사이가 교락되면서 누설전류가 흐를 때의 전압·전류파형이다. 이 누설전류에 의해 형성된 건조대에 전계가 집중되어 부분 방전이 처음으로 시작된 것이 그림 (c)이고, (d)는 방전이 상당히 진전되었을 때이다. 두 경우 모두 전압파형의 차이는 없고 단지 전류파형에 의해 구분할 수 있었다.

열화가 가중되면서 탄화가 시작되는 것이 (e)이다. 미소발광방전(scintillation)이 수반되면서 급격히 탄화가 진전되고, 양 전극 사이에 탄화도전로가 생성, 트래킹 파괴에 이른 것이 (f)이다.

이상은 트래킹의 진전상태에 대한 구분으로 기존의 방법과 동일하게 외관상의 차이와 전류파형에 의존하였다. 그러나, 전기 설비의 경우 대부분 덕트 등에 내장되어 있어서 방전 모습을 직접 볼 수 없고, 전류파형은 측정이 어렵다. 또한, 측정이 쉬운 전압파형 만으로는 트래킹의 진전을 구별하는 것은 불가능하다.

본 논문에서는 측정이 쉬운 전압파형 만으로 트래킹의 진전과정을 구별하려고 한다. 그림 4의 전압파형들에 대하여, 식 (3)을 이용하여 시간-에너지 변환을 수행한 것이 그림 5와 그림 6이다. 그림 5는 제1고조파만으로 구성된 시간-에너지 변환으로 정상상태 때에 대하여 단락상태와 트래킹과

괴 시는 구분이 명확하지만 나머지 경우는 쉽게 구별되지 않는다.

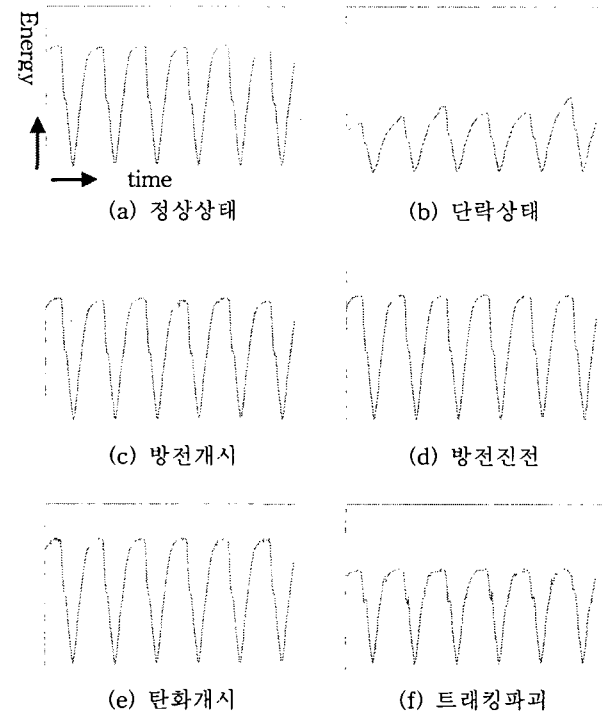


그림 5. 시간-에너지 분석 (제1고조파, $\sum_{k=1} f_k(t)$)
Fig. 5 Time-Energy analysis (1stharmonic, $\sum_{k=1} f_k(t)$)

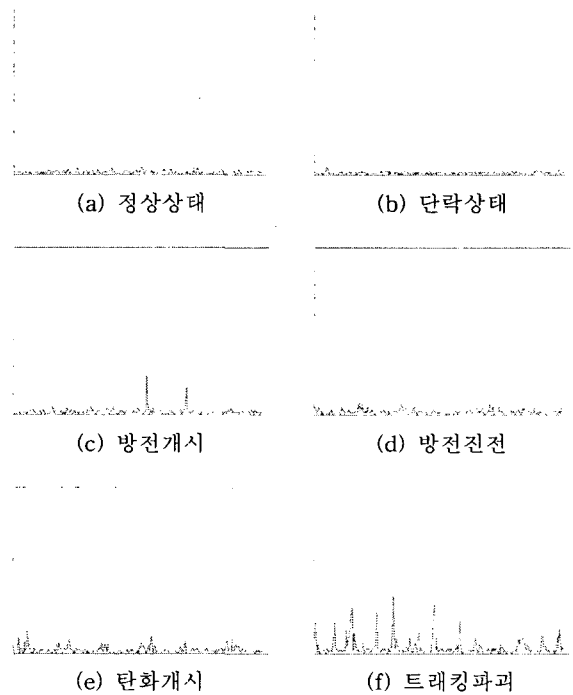


그림 6. 시간-에너지 분석 (제3고조파, $\sum_{k=3} f_k(t)$)
Fig. 6 Time-Energy analysis (3rdharmonic, $\sum_{k=3} f_k(t)$)

그림 6은 제3고조파만으로 구성된 시간-에너지 변환으로 정상상태 파형에 대하여 방전개시, 탄화개시 및 트래킹파괴 시에 구분이 명확하다.

이상과 같이 각 고조파(본 논문의 분석에서는 제0고조파에서 제256고조파까지)에서 정상상태 때와 비교하여 차이가 날 때와 나지 않을 때를 비교하여 그래프로 그린 것이 그림 7이다.

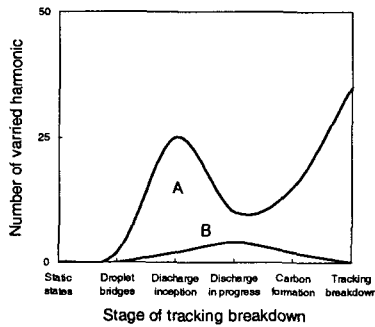


그림 7. 방전 전 단계에 따른 참여 고조파의 수
Fig. 7 Relation between stage of tracking breakdown and number of varied harmonic

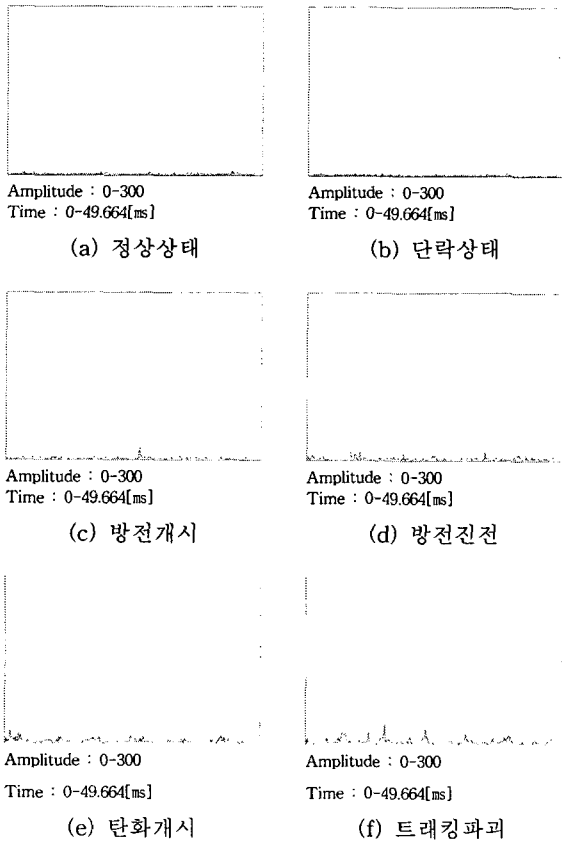


그림 8. 시간-에너지 분석 (제4~제10고조파, $\sum_{k=4}^{10} f_k(t)$)
Fig. 8 Time-Energy analysis (4th~10thharmonic, $\sum_{k=4}^{10} f_k(t)$)

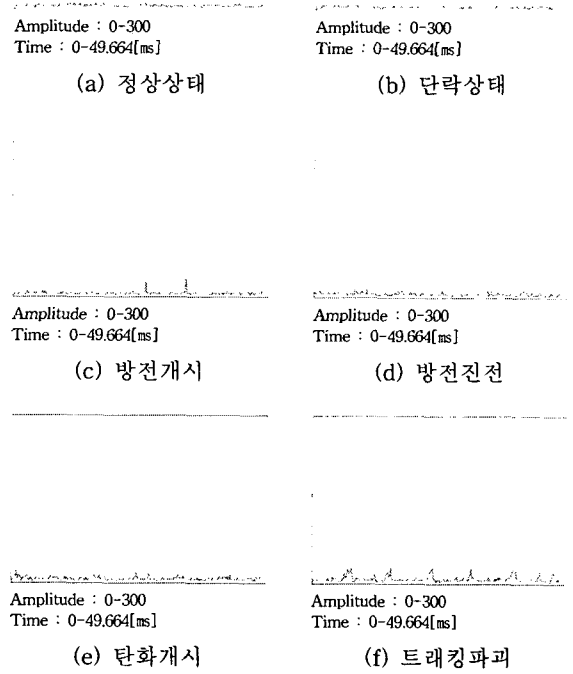


그림 9. 시간-에너지 분석 (제11~제25고조파, $\sum_{k=11}^{25} f_k(t)$)
Fig. 9 Time-Energy analysis (11th~25thharmonic, $\sum_{k=11}^{25} f_k(t)$)

그림 7을 통해 전기 설비의 이상신호를 분석해 보면 다음과 같다.

전기설비에서 이상 징후가 보이기 시작하면 가장 먼저 제4고조파에서 제10고조파 성분들(그림 7의 B 영역)에게서 변화가 생기게 된다. 많은 고조파 성분들(본 논문의 분석에서는 257개)이 합쳐져서 이루어진 전압 파형에 10개 정도의 고조파에 의한 영향은 아주 미세한 것이어서, 아직까지는 전압 파형의 변화를 사람의 눈으로 감지하기는 어렵다.

사고가 진전되면서 변화에 동참하는 고조파가 제2고조파에서 제15고조파까지, 경우에 따라서는 제25고조파까지(그림 7의 A영역)로 늘어나게 되면 전압 파형에 미치는 영향도 더욱 커지게 되므로, 특정 영역만을 확대하여 관찰한다면 사람의 눈으로도 감지가 가능하다. 그림 4 (c)를 자세히 관찰해 보면 전류 파형의 고주파 성분이 나타나는 위치에서 전압 파형도 고주파 성분이 나타나는 것을 볼 수 있다.

변화에 동참하는 고조파가 더욱 늘어나게 되면 그림 4 (f)와 같이 그 합인 전압 파형만으로도 사고를 충분히 감지할 수 있게 된다. 하지만 이때는 이미 사고(트래킹 파괴)가 일어나고 있는 중이다.

즉, 보다 많은 고조파 성분들에서 이상 징후가 보이면서 사고가 점차 진전되어 감을 알 수 있다.

그림 7의 결과를 바탕으로 시간-에너지 분석을 행한 것

이 그림 8에서 그림 10이다.

그림 8은 그림 7에서 미세한 변화에도 반응을 보이는 것으로 판단되는 제4고조파에서 제10고조파들의 합으로 만든 것이다. 이번 실험에서 가장 미세한 변화를 보여주었던 방전 진전에서도 뚜렷한 변화를 보이고 있다.

그림 9는 보다 큰 변화가 있어야만 반응을 보이던 제11고조파에서 제25고조파 사이의 합으로 구성된 것이다. 그림 7의 추측대로 방전 진전에서는 변화가 거의 보이지 않고, 변화가 비교적 컸던 방전개시와 탄화개시, 트래킹과피 시에 뚜렷한 변화를 보이고 있다.

그림 10은 분할-FFT 분석에 사용된 모든 고조파 성분들을 합한 것이다.

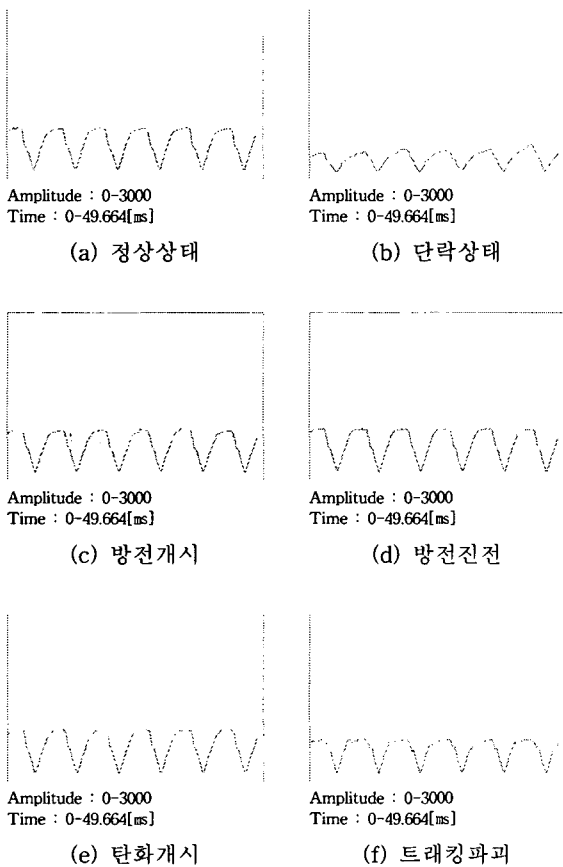


그림 10. 시간-에너지 분석 $(\sum_{k=0}^{256} f_k(t))$
 Fig. 10 Time-Energy analysis $(0^{th} \sim 256^{th} \text{harmonic}, \sum_{k=0}^{256} f_k(t))$

표 1은 그림 4의 전압파형, 그림 8, 그림 9를 이용하여 트래킹진전과정을 구분한 표이다.

이상의 분석 결과, 방전과정을 분석하기 위해서는 하나 혹은 몇 개의 특정 고조파에 대한 시간-에너지 분석보다는, 표 1과 같이 전압 파형과 함께 특징을 가지는 고조파들에 대한 시간-에너지 분석(그림 8과 그림 9)을 관찰함으로써 전기설비의 이상 유무를 진단하는 것이 보다 더 정확할 것으로 판단된다.

표 1. 시간-에너지 분석의 예

Table 1. Example of time-energy analysis

전압 파형 (그림 4 (a)~(f))	$\sum_{k=4}^{10} f_k(t)$ (그림 8)	$\sum_{k=11}^{25} f_k(t)$ (그림 9)	분석 결과
그림 4(a) V:기준	(a):기준	(a):기준	정상 상태
그림 4(b) V:×	(b):○	(b):○	단락 상태
그림 4(c) V:○	(c):×	(c):×	방전 개시 (고주파:1개)
그림 4(d) V:○	(d):×	(d):○	방전 진전
그림 4(e) V:○	(e):×	(e):×	탄화 개시 (고주파:여러개)
그림 4(f) V:×	(f):×	(f):×	트래킹 과피

※ ○ : 기준(정상 상태)과 동일, × : 기준과 차이가 큼

6. 결 론

측정이 용이한 전압파형만으로 전기설비의 이상신호 중 하나인 트래킹의 진전단계를 분석한 결과는 다음과 같다.

(1) 시간에 따른 Amplitude의 분석 결과, 전압파형에 있어서 정상상태와 그 차이가 미세한 방전진전은 10개 미만의 고조파(제4고조파에서 제10고조파)에서 변화를 보이기 시작하였다.

(2) 정상상태와 그 차이가 좀 더 큰 방전개시의 경우 20개 이상의 주파수(제2고조파에서 제15고조파 혹은 제25고조파)에서 변화를 보였다.

(3) 정상상태와 그 차이가 명확한 트래킹 과피에 이르게 되면 보다 더 많은 고조파에서 변화를 볼 수 있었다.

(4) 시간에 따른 Amplitude 분석 결과를 토대로, 시간-에너지 분석 도구를 이용하여 트래킹 과피의 진전 단계를 분석하였다. 본 논문에서는 제4고조파에서 제10고조파의 합과, 제11고조파에서 제25고조파의 합으로 구성된 시간-에너지 분석이 사용되었고, 트래킹의 진전 과정을 명확히 구분할 수 있었다.

본 논문에서는 시간-에너지 분석방법에 1[MHz]의 낮은 사양으로 측정된 전압만을 사용하였다. 특히, 개인용 컴퓨터와 소프트웨어로만 신호처리 함으로써 기존의 설비에 적용하더라도 추가 비용이 적고, 측정 장치의 설치가 쉽다. 컴퓨터의 네트워크 기능을 이용한다면 원격 감시 설비 구축도 가능할 것으로 생각된다.

나아가 패턴 인식 기술이나 신경망 알고리즘을 부가한다면 사고 예측 시스템 개발도 가능할 것이다.

참 고 문 헌

[1] 행정자치부, "2002년도 화재통계연보", 11-1310000-000002-10, 2003.
 [2] 한국전기안전공사, "전기재해 통계분석", 2002.
 [3] 이춘하 외, "전기화재공학", pp. 172-211, 2000.
 [4] 김학민 외, "선도기술개발사업의 프로그램 종합분석에"

- 관한 연구 I”, 한국과학기술기획평가원, 2002.
- [5] 최기련 외, “선도기술개발사업 (G7) 프로그램 종합분석 연구 II”, 고등기술연구원, 2003.
 - [6] 최병화, “有機絶縁材料의 Tracking 破壊에 관한 研究”, 석사학위논문, 영남대학교, 1985.
 - [7] 西田眞,吉村昇,能登文敏, “有機絶縁材料表面のトラッキング破壊における乾燥帯の形成過程”, 전기학회논문지, A pp.593-600, 昭58-A72.
 - [8] 吉村昇,西田眞,能登文敏, “有機絶縁材料表面のトラッキング破壊における炭火開始過程(IEC 112 方法の場合)”, 전기학회논문지, A pp.429-436, 昭56-A54.
 - [9] IEC 60112, “Method for determining the comparative and the proof tracking indices of solid insulating materials under moist conditions”, 1979.

저 자 소 개



지 승 욱 (池昇昱)

1971년 12월 27일생. 1995년 영남대 전기공학과 졸업. 2005년 동 대학원 졸업 (박사)

Tel : 053-815-7291, Fax : 053-810-4629

E-mail : skraken@chol.net



이 광 식 (李廣植)

1948년 10월 20일생. 1971년 영남대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 졸업 (박사). 1988~1989년 Nagoya Institute of Technology 초빙교수, 당학회 방전고전압연구회 간사장 역임, 영남대학교 산업대학원장 역임, 현재 한국조명·전기설비학회 회장, 당학회 C부문회 감사, 영남대 공대 전기공학과 교수

Tel: 053-810-2486, Fax: 053-810-4629

E-mail : kslee@yu.ac.kr



이 춘 하 (李春夏)

1953년 10월 20일생. 1979년 영남대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 졸업 (박사). 1985~1994년 한국기계연구원 실장. 현재 호서대 환경안전공학과 소방학과 교수

Tel : 041-540-5732, Fax : 041-540-5728

E-mail : leecha@office.hoseo.ac.kr



심 광 열 (沈光烈)

1961년 9월 8일생. 1983년 경남대 전기공학과 졸업. 1991년 영남대학교 대학원 졸업(박사). 1985~1991년 현대중공업(주)기전연구소 선임연구원, 현재 울산과학기술대 전기전자통신학부 부교수

Tel: 052-279-3148, Fax: 052-279-3238

E-mail : kysim@mail.uc.ac.kr



김 충 년 (金忠年)

1966년 6월 16일생. 1992년 영남대 전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 졸업(박사). 1995~1998년 (주)대우중공업 우주항공연구소 주임연구원, 현재 (주)인터커넥션 책임연구원

Tel : 053-815-7291, Fax : 053-810-4629

E-mail : kchn0512@hanmail.net