

# DSP를 이용한 주상변압기 유전정접 측정기법 연구

(Research of Tan $\delta$  Measurement on Pole Transformers using DSP)

金載哲\* · 李輔鎬\* · 金彥錫\*\* · 崔度赫\*\*\* · 李壽吉\*\*\*\*

(Jae-Chul Kim · Bo-Ho Lee · Oun-Seok Kim · Do-Hyuk Choi · Su-Kil Lee)

## 요 약

본 논문은 DSP를 이용한 주상변압기 유전정접(tan $\delta$ ) 활선 측정기법을 제안하였다. 변압기 내부에 콘덴서를 삽입한 후 센서에 전압을 인가하고, 인가된 전압과 콘덴서에 흐르는 전류를 측정하여 본 논문에서 제안한 상호 상관 함수 기법을 이용하여 유전정접을 구하였다. 측정의 성능 향상을 위해 TMS320C31 DSP 보드를 사용하였으며 상호 상관 함수 기법을 사용하였다. 또한 노이즈 영향을 검토하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 본 연구의 검증은 위해 본 논문에서 구현한 측정장치와 Schering bridge을 사용하여 비교 실험을 하였다. 실험 결과 주상변압기 절연진단에 충분히 활용할 수 있음을 알 수 있었다.

## Abstract

This paper describes the dissipation factor measuring techniques of insulating oil on operating pole transformers by using digital signal processor. After applying voltage to the condenser which is installed in a transformer, acquiring source voltage and current of condenser and using cross-correlation techniques, we can check the dissipation factor of insulating oil. To improve measuring accuracy and the speed of process, we use hardware such as TMS320C31 DSP board and software such as cross-correlation techniques. We simulated the measuring accuracy and the degree of the noise effect of this new measuring techniques by using computer simulation, and compared the simplified measuring devices with Schering bridge on degraded insulating oil. The result showed that this measuring technique can be used as diagnostic method on the pole transformers.

## 1. 서 론

변압기에 사용하는 절연유는 전기적 절연과 냉각작용에 중요한 역할을 담당하고 있다. 그러나,

\*正會員：崇實大學校 電氣工學科 教授

\*\*正會員：韓國電氣研究所 前任技術員

\*\*\*正會員：韓國建設技術研究員 前任研究員

\*\*\*\*正會員：韓國鐵道技術研究員 主任研究員

接受日字：1997年 1月 30日

변압기 운전중 절연유는 온도, 수분, 산소 등의 영향을 받아 열화하여 절연내력 및 냉각능력이 현저하게 저하되며 절연과피와 같은 사고로 파급되는 경우가 있다.<sup>1)</sup> 그러므로 절연유의 열화에 대한 진단은 매우 중요하다. 현재 변전용 주변압기에 대한 열화진단 기법은 가스분석법, 부분방전 측정법 등 여러가지 진단기법이 있으나 주상변압기에 대해서는 전무한 상태이다. 대신 주상변압기에 대한 관리기법은 일정주기별로 변압기를 철거하여 진단하는 시간기준법을 적용하고 있으나, 이러한 방법의 단점은 철거 및 재설치에 따른 비용증가 및 정전에 따른 정전비용이 증가하게 된다. 이 문제의 해결방안으로 주상변압기를 활선상태에서 진단하여 절연이 현저히 나빠진 경우에만 철거하여 보수하는 상태기준법을 적용할 필요가 있다. 주상변압기의 진단에 상태기준법을 도입하려면 활선상태에서 측정 가능한 진단항목의 선정 및 측정기기의 개발이 요구된다. 특히 절연진단의 경우 절대적인 수치보다는 변화경향이 중요하므로 용이한 데이터 저장 및 컴퓨터에 의한 분석이 가능해야 한다. 절연유의 열화는 절연과피 전압, 산가, 체적저항, 유전정접, 산화안정도, 점도, 인화점, 색깔 등에 영향을 미치므로 이들 요소를 측정하면 열화의 정도를 판단할 수 있다.<sup>2)</sup> 이 중에서 절연유 열화도와 관련이 높고 손쉽게 측정 가능한 것으로는 유전정접 측정법이 있다. 현재까지의 유전정접 측정기법은 Schering bridge 등을 이용한 정밀측정법을 사용하였다. 그러나 이 방법은 주상변압기와 같이 절연유 드레인 밸브가 없는 경우에는 채취하기가 매우 곤란하고, 실험실에서 분석을 해야하므로 현장성이 떨어지며, 특히 1996년 현재 전국적으로 90여만 대에 이르고 있는 모든 주상변압기에 적용하기는 곤란하다.

본 논문에서는 운전중인 주상 변압기 절연유의 유전정접을 현장에서 측정할 수 있는 활선 측정기법을 제안하였으며 측정장치를 개발하였다. 유전정접을 측정하기 위하여 변압기내에 콘덴서를 설치한 후, 양 단자간에 전압을 인가하고 인가전압 및 전류를 측정하여 상호 상관 함수 기법 및 기타 신호처리 기법을 이용하여 유전정접을 구한

다. 측정 정밀도 및 처리속도를 향상시키기 위하여 하드웨어적으로는 TMS320C31 DSP 칩과 16비트 A/D 변환기를 사용하였으며, 소프트웨어적으로는 Fast Fourier Transform(FFT)에 의한 상호 상관 함수 기법을 적용하였다. 또한 유전정접의 변화 경향을 분석하기 위해 변압기 고유번호별로 데이터베이스화하여 측정 데이터의 보관 및 경향분석을 용이하게 하였다.

본 논문에서 제안한 측정기법을 MATLAB을 이용하여 노이즈의 영향을 시뮬레이션하였으며, 주상변압기의 경년 열화된 절연유에 대하여 실험실용 Schering bridge와 본 논문에서 구현한 측정장치를 이용하여 측정결과를 비교한 결과 주상변압기의 절연유 열화진단에 충분히 적용할 수 있음을 입증하였다.

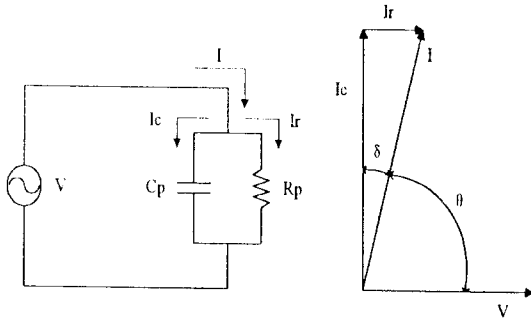
## 2. 유전정접의 기초이론

### 2.1 콘덴서의 등가회로 및 벡터도

절연시스템에서의 유전손실은 교류전압을 인가하였을 때 절연체에서 손실되는 전력량이다. 일반적으로 양호한 절연체는 손실이 매우 적으며 손실이 큰 경우에는 시스템에 많은 문제를 야기하게 된다. 습기 또는 화학물질에 의한 절연체의 오염은 정상시 보다 큰 손실을 야기한다. 이러한 손실은 유전정접 또는 역률로 측정할 수 있다. 그림 1은 손실이 있는 콘덴서에 대한 병렬 등가회로 및 벡터도를 나타낸 것이다. 교류전압을 인가할 때 절연체에는 전류의 흐름이 발생한다. 총 흐르는 전류는 각각 측정되는 저항분 전류와 콘덴서분 전류의 두 개의 성분으로 분류된다. 유전정접은 콘덴서분 전류에 대한 저항분 전류의 비율이며, 역률은 절연체에 흐르는 전체 전류에 대한 저항분 전류의 비로서 간단히 정의된다.<sup>3)</sup> 대부분의 전력설비용 절연체에 대하여 유전정접과 역률은 매우 유사하다. 유전손실과 관련된 이러한 양들은 그림 1의 각 전류에 대하여 식(1)과 식(2)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\text{유전정접}(\tan\delta) = \frac{I_r}{I_c} = \frac{1}{\text{WR}_r C_r} \quad (1)$$

$$\text{역률}(\cos\theta) = \frac{I_r}{I} = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 R_p^2 C_p^2}} \quad (2)$$



V : 인가전압

I : 총전류

I : 캐패시터에 흐르는 전류

I<sub>r</sub> : 저항에 흐르는 전류

C<sub>p</sub> : 병렬회로의 등가 캐패시턴스

R<sub>p</sub> : 병렬회로의 등가 저항

δ : 손실각

θ : 위상차

그림 1. 유전정접 측정을 위한 등가회로

Fig. 1. Equivalent circuits for tanδ measurement

## 2.2 유전정접의 파라미터

### 2.2.1 유전정접과 측정전압 관계

일반적으로 전압은 절연물의 정격전압 부근 또는 그 이하의 범위에서 변화시켜 전압 상승시와 하강시의 쌍방향의 특성을 구한다. 이 경우 절연물의 절연상태가 양호하면, 유전정접은 거의 일정하나, 절연물의 흡습, 노화 등의 상태에 있는 경우에는 전압에 따라 유전정접은 증가하게 된다. 또 전압 상승시와 하강시의 유전정접이 일치하지 않는 경우도 있다. 그러므로 유전정접 측정시 측정전압을 기록하여야 한다.<sup>4)</sup> 그러므로 인버터와 같은 전압가변 장치를 이용하면 여러가지 전압관련 특성을 구할 수 있으므로 절연진단시 고려해 볼 만한 사항이다.

### 2.2.2 유전정접과 측정온도 관계

절연물의 유전정접은 대부분 온도에 따라 변화

되며, 수분 함량이 많은 경우 현저하기 때문에 절연물의 유전정접-온도특성에 따라 절연유의 절연상태를 추정할 수 있다. 또한 유전정접 값이 성능을 좌우하는 기기에서는 유전정접-온도특성이 중요하다. 절연물의 온도를 일정하게 유지시키면서 시험하는 것이 곤란한 경우에는 측정결과에 대해서 절연물 내부의 온도분포를 고려한 정확한 판단이 중요하다.<sup>4)</sup> 온도계수와 관련하여 IEEE Std C57.12.90-1993 규격에서는 변압기 절연역률에 대한 보정계수를 제시하였다.<sup>5)</sup>

### 2.2.3 유전정접과 측정주파수 관계

절연유의 유전정접은 일반적으로 주파수 25 [Hz]~1,000 [Hz] 범위에서 주파수가 올라갈수록 떨어진다고 알려져 있다. 그 이유는 절연유에 포함된 절연분극 현상에 기인한다. 두 가지의 가장 중요한 요소는 쌍극자의 회전에 의한 배향분극과 물질의 불연속에 기인하는 계면분극이다. 유전정접이 주파수에 따라 어떻게 변하는가는 절연손실의 특성, 즉 절연손실이 분자에 기인하는가 아니면 이온에 기인하는가, 아니면 모두에 기인하는가에 따라 다르다. 따라서, 주파수가 아주 높은 영역에서 측정하거나 아주 낮은 영역에서 측정된 경우에는 60 [Hz]로 간단히 변환하는 변환계수는 존재하지 않는다고 알려져 있다. 일반적으로 주파수는 기기에 사용되는 전원의 주파수에서 측정함이 타당하다고 알려져 있다.<sup>4)</sup>

### 2.3 유전정접에 의한 절연유의 노화판정 기준

변압기 절연물의 유전정접은 온도와 밀접한 상관관계가 있으며, 절연유에 대하여 온도 및 유전정접에 따른 노화판정 기준은 I.W.GROSS식 곡선이 일반적으로 사용된다. 이 곡선은 온도에 따른 변압기 절연역률에 대하여 불량, 요주의, 양호로 구분하여 표시하였다. 여기서 절연역률이란 절연유를 포함한 절연지, 프레스보드 등 변압기 내에 포함된 모든 절연물에 대한 종합적인 수치를 말한다. 절연유 자체의 유전정접에 대한 판정 기준은 일본 전기공업회의 JEM-TR 171 규격에서 제시하였다.<sup>6)</sup> 이 규격에서는 50 [°C], 50

[Hz], 1,000[V]에서의 절연유 유전정접을 양호, 요주의, 불량 영역으로 나누어 표시하였다

### 3. 유전정접 측정원리 및 측정시스템 구성

#### 3.1 유전정접 측정의 기본개념

일반적으로 절연유의 유전정접은 Schering bridge 등을 이용하여 측정한다. 그러나 언급한 여러가지 이유로 추상변압기의 절연유 진단에는 적용하기 어렵다. 그러므로 컴퓨터를 이용하여 측정할 수 있는 새로운 측정기법을 제안하였다.

그림 1 벡터도에서 알 수 있는바와 같이 유전정접은 전압과 전류와의 위상차만 구하면 쉽게 구할 수 있음을 알 수 있다. 본 논문에서는 전압과 전류의 위상차  $\theta$ 를 구한 후,  $\delta = \pi/2 - \theta$ 에 의해 손실각  $\delta$ 를 구하고  $\tan\delta$ 에 의해 유전정접을 구하고자 한다. 그림 1 및 식(1), (2)에서 보는 바와 같이  $I_1$  과  $I_2$  또는  $I$ 와  $I_1$ 을 구하면 유전정접 혹은 역률을 구할 수 있다. 그러나 이러한 물리량은 실제적으로 구분하여 측정하기 어려운 사항이다. 다른 한편으로 벡터도를 분석해 보면 인가전압  $V$ 와 저항성분  $I_1$ 은 동상분임을 알 수 있고  $I_2$ 는 총 전류로 측정 가능함을 알 수 있다. 그러므로 인가전압  $V$ 와 총 전류  $I$  파형을 취득하여 위상차를 구하면 바로  $\theta$ 가 된다. 그런 다음  $\delta = \pi/2 - \theta$ 에 의해 손실각을 계산하면 유전정접을 쉽게 구할 수 있다. 본 논문에서는 컴퓨터에 의한 분석을 하기 위하여 상호상관함수를 이용하여 두 파형의 위상차를 구하고자 한다.

#### 3.2 상호 상관함수를 이용한 유전정접 측정기법

상관함수는 상호상관함수(cross-correlation)와 자기상관함수(auto-correlation)의 두 가지 형태가 있다. 상호상관함수는 두 신호의 유사성 그리고 시간차를 알 수 있으며 잡음이 포함된 신호의 검출 및 시간지연 등의 측정에 응용된다. 자기상관함수는 상호상관함수의 특별한 형태로서 어떠한 신호가 잡음과 함께 있을 때 그 신호의 주기검출에 주로 이용된다. 본 논문에서는 인가전압과 콘덴서에 흐르는 전류의 시간지연 문제

이므로 상호상관함수를 이용하였다.

상호상관함수는 시간적으로 연속인 두 신호  $V(t)$ ,  $I(t)$ 에 대해서

$$R_{VI}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T V(t)I(t+\tau)dt \quad (3)$$

와 같이 정의된다. 여기서  $\tau$ 는  $V(t)$  와  $I(t+\tau)$ 의 시간차를 표시한다. 이와 같이 상호상관함수는 연속인 두 신호에 대하여 정의되어 있다. 여기서는 디지털 신호처리를 고려해야 하므로 이산적인 신호로 표현하였다. 일반적으로 표본화한 이산신호  $V(n)$  및  $I(n)$ 의 상호상관함수  $R_{VI}(k)$ 는

$$R_{VI}(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} V(n)I(n+k) \quad (4)$$

로 주어진다. 여기서  $1/N$ 은 상관값을 표준화한 것이고,  $k$ 는  $V(n)$ 가  $I(n+k)$ 와 얼마나 어긋나고 있는가를 샘플점의 수로 표현한 것이다. 상호상관함수값이 최대가 되는  $k$ 에 표본화 간격  $\Delta t$ 를 곱하면 두 신호의 위상차  $\theta$ 가 되며 식 (5)와 같다.

$$\theta = \max_k R_{VI}(k) * \Delta t * 360^\circ / 1024 [\text{deg}] \quad (5)$$

여기서,  $\Delta t$ : 샘플링 간격

그림 2는 상호상관함수를 이용하여 두 파형의 위상차를 구할 수 있음을 보이기 위하여 모의 발생시킨 파형이다. 전압파형을 기준으로 전류파형을 70[deg]앞서게 발생시켰다. 이는 손실각  $\delta$  값이 20[deg]인 경우이다. 여기서 한 주기에 대한 총 샘플수는 1024로하여 샘플 간격당 전기각은  $360[\text{deg}]/1024 = 0.35156[\text{deg}]$ 이다.

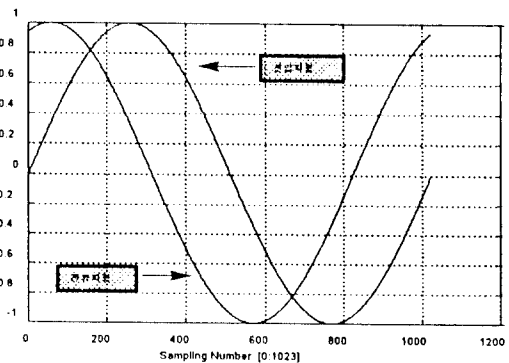


그림 2. 70[deg] 위상차를 가진 두 신호  
Fig. 2. Two signals of 70[deg] phase difference

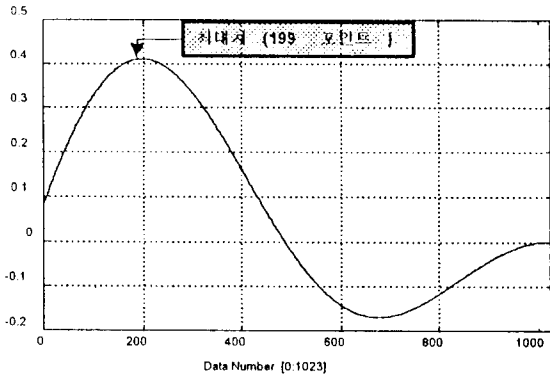


그림 3. 상호상관함수 기법의 결과  
Fig. 3. Result of cross-correlation method

그림 3은 상호상관함수의 결과이며, 최대값에 해당되는 샘플점의 수를 알면 두 파형의 위상차를 구할 수 있다. 상호상관함수 이론에 의하면 두 파형의 위상차는 최대값에 해당하는 샘플점의 수\*360(deg)/1024로 구할 수 있다. 그림 3에서 최대값에 해당하는 샘플링 수가 199이므로  $199 * 360[\text{deg}]/1024 = 69.96[\text{deg}]$ 으로 실제 모의한 실제 위상차 70(deg)와 거의 동일함을 알 수 있다. 결과적으로 상호상관함수에 의한 두 파형의 위상차를 구할 수 있다는 것은 유전정점을 컴퓨터 계산에 의해 쉽게 구할 수 있다는 것을 의미한다. 실제 현장에서 취득된 파형에는 노이즈가 함유되어 있을 것이므로 여러 번의 가산평균이 필요하며 식 (5)를 수정하여 표시하면 식(6)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_{avg} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \theta_i \quad (6)$$

여기서,  $\theta_{avg}$ : 평균 위상차

M: 측정 횟수

그러므로 손실각  $\delta$ 는 그림 1의 벡터도에 의해 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$\delta = \pi/2 - \theta_{avg} \quad (7)$$

최종적으로 식 (7)의 손실각  $\delta$ 에 탄젠트를 취함으로써 유전정점 ( $\tan\delta$ )을 구할 수 있다.

## 4. 시스템 구성

### 4.1 하드웨어 구성

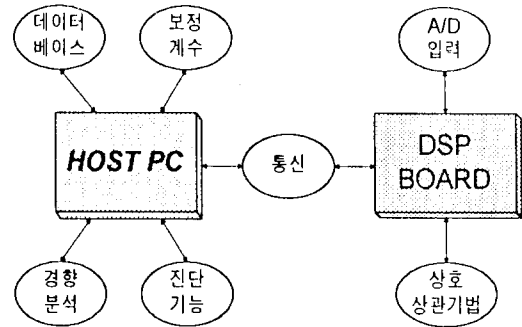


그림 4. 시스템 전체 블록도  
Fig. 4. System block diagram

그림 4는 본 연구에서 구성한 측정장치의 전체적인 블록도이다.

측정 장치는 크게 전원인가 장치, 절연유용 표준선, 데이터 취득 및 신호처리 장치 및 퍼스널 컴퓨터이다. 전압인가 장치는 전압을 20[V]에서 1,200[V]까지 변할 수 있으며 주파수는 20[Hz]에서 1,000[Hz]까지 가변할 수 있다. 표준선은 ASTM 표준선을 사용하였으며 유종의 온도를 제어할 수 있으며, 온도를 측정할 수 있는 열전쌍 센서가 내장되어 있다. 데이터 취득장치는 C, T., P.T, 온도센서 및 이러한 신호들을 증폭하는 AMP로 구성되어 있다. A/D부는 AMP로부터 입력된 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환한다. DSP 보드에서는 디지털화된 데이터를 처리한다. 여기에서 사용된 신호처리용 칩은 Texas Instrument사의 TMS320C31을 사용하였다. 퍼스널 컴퓨터는 전체적인 처리결과를 데이터베이스화하고 모니터로 출력하는 역할을 한다.

### 4.2 소프트웨어 구성도

소프트웨어의 전체적인 구성도는 그림 5와 같다. 소프트웨어는 퍼스널 컴퓨터에서 실행되는 프로그램과 DSP보드에서 실행되는 프로그램으로 구성되어 있다. 퍼스널 컴퓨터에서 측정명령을 내리면 DSP 보드 프로그램은 센서에서 A/D 보드로 전압파형과 전류파형 그리고 온도 데이터를 디지털 값으로 변환한다. 그리고 상호상관함수 기법 및 기타신호 처리기법을 이용하여 유전정점을 계산한 다음 퍼스널 컴퓨터로 전송한다.

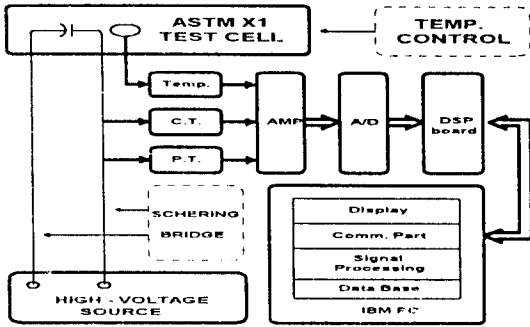


그림 5. 소프트웨어 구성도  
Fig. 5. Software configuration

컴퓨터에서는 측정 데이터에 대하여 온도보정, 고유오차 보정등 후속작업을 완료한 후 결과를 저장한다. 이러한 동작을 지정된 측정횟수만큼 반복하고 최종 완료 후 평균을 계산하여 화면에 출력한다.

그림 6은 그래픽 유저 인터페이스(GUI) 방식으로 작성한 화면을 보여주고 있으며, 그 구성은 입출력하는 모듈, 하드웨어를 설정하는 모듈, 데이터의 입력 및 분석하는 모듈 그리고 경향 분석하는 부분으로 되어있다.

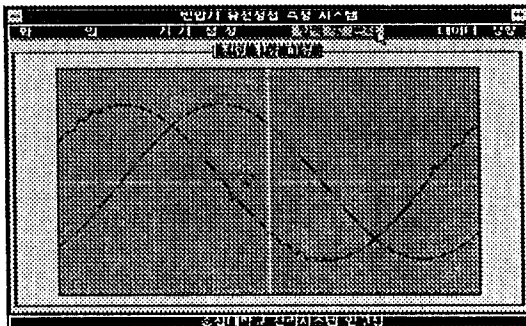


그림 6. 그래픽 유저 인터페이스 화면  
Fig. 6. Graphical user interface screen dump

## 5. 사례연구

### 5.1 시뮬레이션

현장 측정시 주변 노이즈가 문제될 수 있다. 상호상관함수를 사용하여 유전정접을 측정할 때

존재하는 노이즈의 영향을 평가하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였다. 노이즈 시뮬레이션 조건은 표 1과 같다.

그림 7은 노이즈 영향에 대한 시뮬레이션의 결과이다. 그림에서 가로축은 전압파형과 전류파형의 위상차이며 유전정접 값을 고려하여 60 [deg]에서 85[deg]까지 5[deg] 단위로 증가하면서 시뮬레이션을 수행하였다. 세로축은 정확한 위상차에 대한 상관함수 계산치의 오차이며 정확도를 위하여 10회 반복하여 평균한 값이다. CASE 1과 같이 고조파의 비율이 적은 경우는 오차가 거의 발생을 하지 않았다. CASE 2는 전류파형의 고조파 비율을 약간 증가한 경우이고 이때에도 오차는 적었다. CASE 3은 전류파형의 백색잡음을 10[%]로 함유한 결과이며 CASE 1, CASE 2보다는 오차가 많았으나 0.2[deg]정도의 오차는 실제 적용에는 문제가 없을 것으로 사료된다. 노이즈 영향에 대한 시뮬레이션 결과 노이즈가 포함되어 있어도 가산평균을 이용하면 노이즈 문제를 해

표 1. 노이즈 시뮬레이션 조건  
Table 1. Condition of noise simulation

	전압 파형	전류 파형
Case 1	백색잡음 1[%]	백색잡음 1[%] 3 고조파 2[%] 5 고조파 0[%]
Case 2	백색잡음 1[%]	백색잡음 2[%] 3 고조파 2[%] 5 고조파 3[%]
Case 3	백색잡음 1[%]	백색잡음 10[%] 3 고조파 2[%] 5 고조파 3[%]

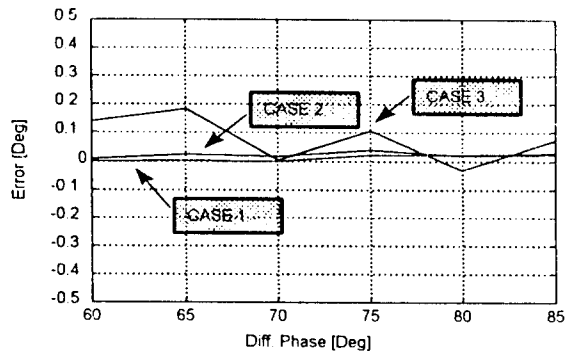


그림 7. 노이즈의 영향  
Fig. 7. Effect of noise

결할 수 있음을 알 수 있었다.

## 5.2 실험방법

실험의 목적은 제안한 구현장치 및 측정기법이 정밀 측정장치와 어느 정도 비슷한가를 검증하기 위한 것이다. 실험방법은 유전정점을 정밀정장치와 구현 측정장치에 의해 비교, 실험하였다. 여러 종류의 유전정점치를 얻기 위하여 절연유의 온도를 제어하면서 측정하였다. 실험에 사용된 시료는 3상 22,900/3,300[V] 500[kVA], 단상 22,900/220[V] 300[kVA], 단상 3,300/220[V] 200[kVA], 3상 3,300/220/660[V] 150[kVA] 변압기에서 채취하였다. 실험은 정밀 측정장치로 측정함과 동시에 퍼스널 컴퓨터에서 DSP BOARD를 제어하여 측정하였다. 데이터 샘플링은 한 주기에 대하여 1024 포인트를 취하기 위해 샘플링 주파수를 59[kHz]로 인가하였다. 또한 신호처리시 주기성이 보장되어야 하므로 구형장 함수를 사용하였다.

현장에서 주상변압기는 활선상태이므로 내부 자장 또는 외부환경에 의해 잡음이 많이 있을 수 있다. 그러므로 노이즈에 대한 영향을 고찰하기 위하여 잡음이 있는 실제파형을 측정하여 보았다. 그림 8은 구현한 측정장치로 측정된 파형이다. 전류파형은 노이즈가 많이 함유되어 있고 전압파형은 노이즈가 없음을 알 수 있다. 전류파형과 전압파형의 위상차는 87.8(deg)이며 유전정점은 0.0384이다.

실측결과 전류신호에는 잡음이 포함되어 있었으

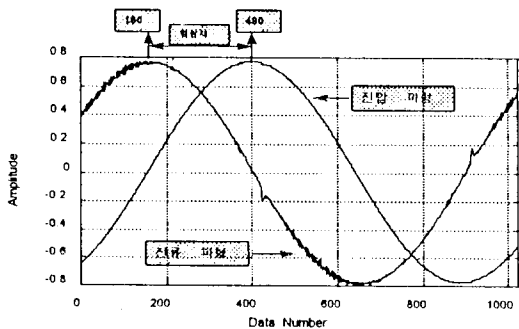


그림 8. 측정된 전압 및 전류 파형  
Fig. 8. Measurement of voltage and current signals

며 측정에러를 줄이기 위해서는 가산평균이 필요하다고 생각하였다. 몇 번 정도의 가산평균이 적절한지를 입증하기 위해 평균횟수를 5회부터 35회까지 5회 단위로 증가시키면서 측정해 보았다. 절연유의 열화도에 따라 손실각 $\delta$ 는 작은 값에서 큰 값으로 변화한다. 그러므로 손실각에 따른 측정오차의 영향을 고찰하기 위해 절연유의 유전정점을 고려하여 60(deg)에서 90(deg)까지를 5(deg)단위로 증가시키면서 측정하여 보았다.

그림 9는 노이즈 및 위상차 조건에 대한 분석 결과를 3차원적으로 표현한 것이다. 그림에서 x축은 가산평균 횟수이고, y축은 참값에 대한 오차이며 단위는 [deg]이고, z축은 전압파형과 전류파형의 위상차이며 단위는 [deg]이다. 그림에서 외부잡음에 의한 영향을 최소화하기 위해서는 35회 정도의 가산평균이 필요함을 알 수 있다. 또한 두 파형의 위상차 크기에 따른 오차는 거의 없음을 알 수 있다. 구현한 측정장치에서 35회 유전정점 계산시간은 약 0.99~1.02[sec] 정도 소요되어 실시간 측정에는 문제가 없음을 알 수 있었다.

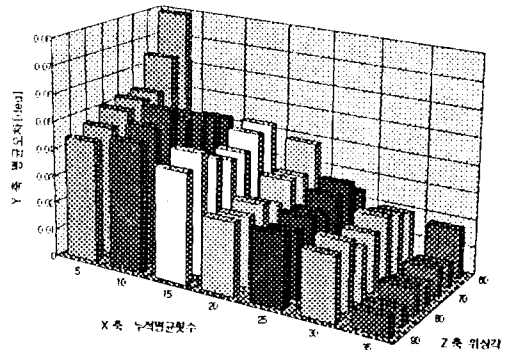


그림 9. 노이즈 및 위상 영향에 대한 결과  
Fig. 9. Result of noise and phase effects

## 5.3 실험 결과 및 고찰

그림 10은 정밀 측정장치와 구현한 측정장치의 유전정점 측정결과이다. 온도를 가변하면서 유전정점을 측정하였고, 사용된 시료는 4개이다. x축은 측정된 유전정점치의 총 개수로 4개의 시

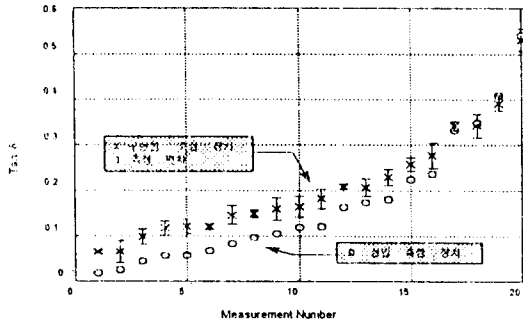


그림 10. 정밀 측정장치와 구현한 측정장치의 유전정접 결과  
Fig. 10. Tanδ result of Schering bridge and proposed measurement device

료에서 서로 다른 유전정접치 20개를 얻었다. y 축은 측정된 유전정접치이다. 측정장치의 결과는 35회를 측정하여 그 평균을 측정치 x로 표시하였고, 최대값과 최소값을 l로 표시하였다. 표시는 정밀 측정장치(Schering bridge)의 측정치이다. 유전정접 0.35이상에서는 정밀 측정장치와 구현한 측정장치의 결과는 매우 비슷함을 알 수 있다. 유전정접 0.35이하에서는 유전정접 0.05정도의 오차가 존재하였다. 이러한 오차는 구현한 측정장치에 포함된 고유오차 및 측정오차를 포함하고 있으며, 실제 현장에서 사용하기 위해서는 보정계수가 필요하다. 전체적으로 두 측정장치 사이에 오차는 존재하지만 변화경향은 매우 비슷함을 알 수 있다.

### 5.4 보정계수

그림 11은 정밀 측정장치와 본 논문에서 구현한 측정장치의 실험결과 및 보정계수를 이용하여 보정한 값을 나타내고 있다. x축은 시료에 대한 총 측정횟수이고 y축은 측정된 유전정접이다. \* 표시는 구현 측정장치로 측정된 유전정접치이고 표시는 식 (8)을 이용하여 오차를 보정한 후의 값이다. 표시는 정밀 측정장치의 측정치이다. 보정후의 유전정접치(\*)가 정밀 측정장치의 유전정접치(○)에 근접함을 알 수 있다. 보정계수 식은 Polynomial curve fitting 방식을 사용하였으며 식 (8)과 같다.<sup>7)</sup>

$$P_{tan}(TD)$$

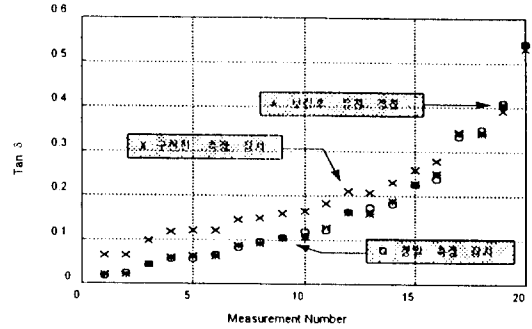


그림 11. 보정계수를 적용한 유전정접  
Fig. 11. Tanδ of application at calibration factor

$$= a_1 * (TD)^3 + a_2 * (TD)^2 + a_3 * (TD) + a_4 \quad (8)$$

여기서,

$P_{tan}(TD)$  : 유전정접 보정 3차함수

TD : 제안한 방법의 측정치(Tangent Delta)

$$a_1 : 4.6522 \quad a_2 : -4.2008$$

$$a_3 : 0.8932 \quad a_4 : 0.0028$$

### 6. 결론

본 논문에서는 상호상관함수 기법을 이용하여 주상변압기 절연유의 유전정접을 측정할 수 있는 측정기법을 제안하였으며 측정장치를 구성하였다. 측정 알고리즘은 고속 푸리에급수에 의한 상호상관함수 기법을 사용하고 주기성을 보증하기 위하여 윈도우 함수를 사용하였다. 하드웨어적으로 처리속도를 높이기 위하여 DSP칩을 사용하였다. 노이즈에 대한 영향을 시뮬레이션한 결과 35회 정도의 측정을 하여 가산평균하여야 한다는 사실을 알았다. 본 논문에서 제안한 측정기법 및 측정장치를 검증하기 위하여 열화된 변압기의 절연유를 채취하여 비교 실험한 결과 주상변압기 절연진단에 충분히 사용할 수 있음을 알 수 있었다.

본 논문에서 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 상호상관함수 기법을 이용하여 절연유의 유전정접을 측정할 수 있음을 알 수 있었다.
- (2) 비교 실험결과 절연유 절연진단에 사용할 수 있음을 알 수 있었다.



(3) 구형한 측정장치의 오차를 보정하기 위하여 보정계수 식을 제안하였다.

(4) 현장에서의 노이즈 영향을 줄이기 위해서는 35회 정도의 가산평균이 필요함을 알 수 있었다.

(5) DSP 칩을 이용함으로써 유전정접을 빠른 시간내에 측정할 수 있었다.

(6) 측정결과 및 관련 데이터들을 데이터베이스화하여 유전정접 변화경향을 쉽게 분석할 수 있도록 하였다.

위의 연구결과를 실제 적용하기 위해서는 센서 선정 문제, 온도보상 문제등의 연구가 더 필요하다고 생각한다.

본 연구는 기초전력공학공동연구 과제번호 95-59의 "DSP를 이용한 주상변압기 유전정접 측정기법 연구"에 따른 연구비로 수행되었음.

## 참 고 문 헌

- 1) 한국전력기술연구원, 전력기기 예방진단 기술연구(중간 보고서), pp.18-19, 1985.1.
- 2) 김재철 외, "전력용 변압기 절연유의 비파괴진단시험법의 비교연구," 대한전기학회 논문지, Vol.40, No.3, pp.799-807, 1991.8.
- 3) IEEE Std 4-1995, "IEEE Standard Techniques for High Voltage Testing," pp.14-16.
- 4) ASTM D 150-87, "Standard Test Methods for A-C Loss Characteristics and Permittivity (Dielectric Constant) of Solid Electrical Insulating Materials," pp.40-41.
- 5) IEEE Std C57.12.90-1993, "IEEE Standard Test Code for Liquid Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers and IEEE Guide for Short-Circuit testing of Distribution and Power transformers," pp.46-48.
- 6) JEM-TR 171, "Guide for maintenance and inspection of 6kV oil-immersed distribution transformers," pp.19-21, 1991.4.
- 7) MATLAB User's Guide, Mathworks INC, pp.36-39, Feb. 1993

## ◇ 著 者 紹 介 ◇



김재철(金載哲)

1955년 7월 12일생. 1979년 2월 송실대학교 공과대학 전기공학과 졸업(공학사). 1983년 8월 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1987년 8월 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1988년 3월~현재 송실대학교 공과대학 전기공학과 재직(교수). 1995년 9월~현재 송실대학교 공과대학 전기공학과 학과장



이보호(李輔鎬)

1936년 5월 31일생. 1961년 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업(공학사). 1972년 전북대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1986년 인하대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1988년~1990년 송실대학교 공과대학장. 1990년~1993년 송실대학교 부총장. 1994년~1995년 캐나다 Univ. of Waterloo 객원연구원. 1972년~현재 송실대학교 공과대학 전기공학과 재직(교수).



김언석(金彦錫)

1965년 2월 11일생. 1989년 2월 송실대학교 공과대학 전기공학과 졸업(공학사). 1997년 2월 송실대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 현재 한국전기연구소 전력시험부 선임기술원 재직



최도혁(崔度赫)

1962년 3월 9일생. 1988년 2월 송실대학교 공과대학 전기공학과 졸업(공학사). 1991년 2월 송실대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1994년 9월~현재 송실대학교 대학원 전기공학과 박사과정. 현재 한국건설기술연구원 기전연구실 선임연구원 재직



이수길(李壽吉)

1971년 3월 12일생. 1995년 2월 송실대학교 공과대학 전기공학과 졸업(공학사). 1997년 2월 송실대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 현재 한국철도기술연구원 주임연구원 재직.