

권선형기기 On-line 부분방전 측정용 6.6kV급 Ceramic Coupler의 신뢰성 평가

論 文
54C-2-5

Evaluation of Reliability on the 6.6kV Class Ceramic Coupler for On-line Partial Discharge Measurement in Winding Machines

姜 東 植[†] · 金 容 柱^{*} · 尹 英 浩^{**}
(Dong-Sik Kang · Yong-Joo Kim · Youn-Ho Yun)

Abstract - In order to improve the reliability of high voltage rotating machines and mold transformers, it is necessary to understand the breakdown mechanism and life assessment of the high voltage winding parts. Especially the on-line PD test provides the ability to monitor effects, such as slot discharge, internal discharge, and end-winding discharge without interrupting the electrical machines, this method has been proven the major testing technology. Capacitive couplers have been the most widely used sensors for the on-line partial discharge detection in rotating machines nowadays. This paper deals with the electrical characteristics and long-term reliability of a ceramic coupler(CC), which can be easily mounted into high voltage input terminal part, has been developed and tested to continuously measure PD activity during operating condition. This paper presents electrical characteristics (dielectric loss angle, capacitance, PD inception level, breakdown voltage, and frequency response bandwidth) and long-term life test result of the developed 6.6 kV class on-line ceramic coupling sensor. It was found that this sensor had good electrical characteristics to detect PD activity during the operating condition with its detection frequency band is between several and several tens MHz. Also, the voltage life of the 6.6kV class ceramic coupler was calculated over 60 years.

Key Words : 권선형기기, 부분방전, Ceramic Coupler, 신뢰성, 열화

1. 서 론

산업설비로 많이 사용되는 고압 회전기 및 변압기 등의 권선형기기는 장기간 사용함에 따라 고압 고정자 권선 및 고압권선의 절연부분이 열화되면서 예상치 못한 절연파괴 발생가능성이 증가하게 되고, 치명적 고장으로 진전되면서 많은 손실을 일으킨다. 이러한 권선형기기의 권선의 열화진단을 위한 방법의 하나로 권선에서 발생하는 부분방전을 측정하는 기술에 관한 많은 연구가 진행되어왔다. 이러한 권선형기기의 절연열화 진단방법으로는 기기를 정지하고 절연상태를 측정하는 off-line 진단법과 실사용 조건으로 운전 중인 상태에서 절연상태를 측정하는 on-line 진단방법으로 대별된다[1-3]. On-line 진단법 중 부분방전 진단법은 운전 중에 연속적으로 절연상태를 감시할 수 있는 장점이 있어 초기진단 개념으로 최근 활발한 연구가 수행되고 있다. 최근 북미에서는 고압부에 직접 접촉시키는 접촉식 센서로 capacitive coupler인 Epoxy-Mica Coupler (EMC)를 이용한 on-line 부분방전 측정 기술이 개발되어 확대 적용하고 있는 실정에 있다[1-4]. 국내에서도 1990년대부터 회전기 및

변압기 진단에 관한 연구를 수행하여 기반기술을 구축하고 있다[1,5]. 회전기의 on-line 부분방전 측정용 센서로서 현재 가장 폭넓게 사용되고 있는 capacitive coupler는 초기에는 cable type을 사용하였으나, 설치시 문제점 등을 보완한 EMC가 개발되어 사용 중에 있으나 특히 문제 및 높은 가격으로 인하여 국내 확산 설치에 많은 어려움을 지니고 있다. 반면, 최근 사용이 증대되고 있는 몰드변압기의 경우에는 on-line 부분방전 측정용으로 사용될 적절한 고전압부 접촉식 센서가 개발되지 못하여 측정에 어려움이 있다.

이러한 문제점을 극복하기 위하여, 본 논문에서는 6.6kV 급 회전기 고정자 권선의 부분방전을 on-line으로 측정하는 capacitive coupler로 세계 최초로 ceramic coupler를 적용하기 위하여 이를 설계·제작 및 평가를 실시하였다. 또한, 본 연구를 통하여 제작된 ceramic coupler를 6.6kV급 고압 전동기 고정자 권선 및 몰드변압기 고압측에 연결하여 발생하는 부분방전을 측정함에 있어서 가장 중요한 장기 사용상 절연파괴 가능성을 평가하는 신뢰성 실험을 실시하였다. 그 과정에서 운전 중 예상되는 온도상승에 대한 유전손실 문제 및 장기사용 안정성을 평가한 결과 기기의 운전수명인 30년 보다 2배 이상의 수명을 세라믹 센서가 지니는 것으로 나타났다. 따라서, 현장 적용에 문제가 없는 것으로 추정된다.

† 교신저자, 正會員 : 韓國電氣研究院 新電力機器그룹 責任研究員

E-mail : dskang@keri.re.kr

* 正會員 : 韓國電氣研究院 産業電氣研究團 專門委員

** 非會員 : 동우電氣工業(주) 常務理事

接受日字 : 2004年 9月 14日

最終完了 : 2005年 1月 3日

2. 권선형기기 고압권선의 수명 특성

고압절연물이 운전 중에 영향을 받는 주요 열화요인인 기계적, 열적, 전기적 및 환경적 열화요인 중 수명특성과 연관

되어 국제규격에서 인정하는 것은 열적열화로, 고압 회전기 절연물의 열적 수명특성의 경우는 국제 규격인 IEEE Std 275-1992 및 IEC 60034-18-31-1996에서 시험방법 및 평가에 대하여 기술되어 있다[6,7].

이들 규격에 의하면 열적 가속열화는 최소 3가지 다른 온도에서 실시한다. 이때 열화 조건으로 최소 열화온도는 열화시간이 28 일 또는 49 일이 되도록 설정하여야 하며, 그 이상의 2가지 온도는 20 ℃의 간격으로 하여야 한다. 수명 곡선을 작성할 때에는 각 온도에서의 파괴 평균시간, 5개 시료의 모든 파괴시간 및 표준편차의 영향 등을 고려하여 플롯팅한다. 이 방법은 세로축을 $\ln t$, 가로축을 온도로 하여 각 열화 온도에 따른 전체 열화시간(몇 사이클 후에 절연파괴되었는지)을 플롯팅하고 직선을 그어 보간한다. 이들 값으로부터 시험된 시편에 타당한 수명반감 기울기(b) 및 상수 값을 식(1)의 아레니우스식을 적용하여 구한다.

$$L = A e^{b/T} \quad (1)$$

여기서,

L : 파괴까지 도달된 시간(표준편차를 고려한 평균시간)

A : 종좌표(ordiante)와 아레니우스 '수명'곡선과의 교차점을 나타내는 상수

b : 아레니우스 곡선의 기울기와 절연계의 고장은도시간과의 관계를 포함하는 비례계수

T : 절대온도 A 와 b 는 신뢰성 시험일반에 따라 수행한 시험으로부터 구한다.

Endicott와 Eyring는 Dakin[8]이 주장한 화학반응의 활성화 에너지가 부분방전 전계강도에 따라 감소하여 작용한다고 고려한 내용을 이용하여, 화학반응속도 정수 중의 스트레스 함수를 변형하여 통상적으로 전기적 열화를 표현하는데 이용되는 과전수명 식(2)을 도출하여 나타내었다.

$$V^n \cdot t = const. \quad (2)$$

여기서, n : 전기적 열화 종류 및 절연재료에 따른 정수 (수명지수)

수명지수 n 의 값은 전기적 열화 및 절연재료 종류에 따라 변화되는 것으로, 기중 코로나 열화에서는 3~ 4, 유중 코로나 열화 및 트리열화에서는 10~11, 마이카 절연에서는 10~12, 에폭사 절연에서는 6-12 근처의 값으로 나타난 연구결과가 있다[9,10].

3. 부분방전 측정용 capacitive coupler

권선형 기기의 고압측 권선 도체부에 capacitive coupler 를 부착하여 부분방전을 측정하는 기술은 전통적인 off-line 진단기술로 이미 세계적으로 정착된 기술이다. 반면, 이를 이용하여 운전 중 on-line 부분방전 측정 기술로 개발한 것은 북미로서, 운전 중인 회전기의 고정자 권선 도체에 직접 접촉시키는 접촉식 센서로 capacitive coupler인 EMC를 개발하여 보급중에 있다. 이 센서는 개발 초기에 cable type을

사용하였으나, 길이가 길어 설치시 장소의 영향을 받는 등 문제점을 보완한 EMC가 개발되어 사용 중에 있다[11].

현재 가장 많이 보급되고 있는 6.6kV급 80pF EMC 센서의 주파수 특성은 감쇠특성 5dB를 기준으로 했을 때 cut-off 주파수는 10.9~68MHz이며, 전동기용으로 요구되는 내전압 특성은 15kV · rms 이상, 8kV 전압 인가시 부분방전 발생량이 3pC 이하의 특성을 요구하는 것으로 나타나 있다. 또한 EMC의 구조는 capacitor 부분은 마이카 절연 (t=0.3mm)에 금속전극(t=0.025mm)을 부착하여 직병렬회로를 구성한 형태에 외부까지 에폭시로 함침하여 구성하였다. 그러나 이러한 구조는 마이카 및 금속전극을 일정한 크기로 적층하는 제조공정이 어렵고, 제작과정에서 공극이 발생될 가능성이 높으며, 가격이 높아 새로운 capacitive coupler인 ceramic coupler를 검토하여 개발하게 되었다.

본 논문을 통하여 개발되는 ceramic coupler는 정지중 부분방전 측정에는 일부 사용되고 있으나, 운전중 부분방전 측정 센서로는 세계적으로 개발 및 실용화가 현재까지 이루어지지 않은 것으로 독창성 및 저가격의 생산이 가능한 것으로 판단되어졌다.

3.1 Ceramic coupler 기본 특성 및 제조

Ceramic coupler(CC)의 주원료인 자기 콘덴서는 고유전체로서 TiO₂, BaTiO₃, SrTiO₃ 등의 자기를 주성분으로 하고 전극은 자기에 직접 은(Ag)을 소부하여 제조하는 무극성, 무기질의 콘덴서로서 전하가 축적되는 기능을 지닌다. 이러한 자기 콘덴서는 특성에 따라 온도보상용(temperature compensating), 고유전율(high dielectric), 반도체 및 교류전원용으로 구분된다.

본 연구에서 개발한 CC에 이용된 ceramic compound는 온도보상용 계열로서 온도에 따른 용량변화가 직선적이며 유전율의 온도의존성도 적은 재료를 선택하였으며, 제조조건을 고려하여 6.6kV급 105pF의 정전용량을 가지는 것으로 제작되어졌다.

Coupler의 정전용량 설계는 식(3)과 같이 할 수 있다.

$$C = (8.854 \cdot 10^{-8} \cdot \epsilon_r \cdot S) / d \quad [\mu F] \quad (3)$$

여기서, ϵ_r : 유전체의 비유전율, S : 유전체의 표면적 [cm²], d : 유전체의 두께[cm]

부분방전을 측정하는 ceramic compound로 개발되는 소체는 EMC 센서의 특성중 제일 주요 특성인 주파수 응답특성을 만족하면서 다른 전기적 특성을 만족하도록 설계되어졌다. 이를 위하여 유전율이 300 근처인 SrTiO₃에다 적정 첨가재를 배합하여 소체를 원통형으로 수십 kg/cm²의 압력으로 성형하였다. 또한, 소체의 양쪽 전극 면에 은(Ag)으로 프린팅 후 800℃로 소성한 금속 전극 층을 형성하는 구조로 하여 기계적 접착력을 높였다. 그림 1은 개발과정을 거쳐 설계 제작된 105pF의 CC 소체로서, 그림에서 보는 것과 같이 105pF 소체는 210pF 소체 2개를 직렬로 연결한 구조로 구성되었다.

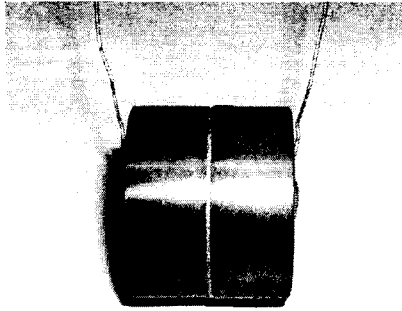


그림 1. 설계 제작된 105pF CC 센서의 소체 형상
Fig. 1. Configuration of 105pF CC element

3.2 CC 소체의 전기적 특성 분석

제작된 105pF의 정전용량 값을 가지는 CC 소체에 대한 주파수 응답특성, 유전전압 특성 및 부분방전 시험을 실시하였다.

그림 2는 Network analyzer(HP사, Model 81532S)를 이용하여 주파수에 따른 응답특성을 분석한 것으로, 감쇠특성 5dB를 기준으로 했을 때 주파수 특성은 9~110MHz로 나타났다. 이는 앞서 언급한 6.6kV급 80pF EMC의 측정 주파수 대역보다 폭이 넓은 것으로 더 넓은 대역의 부분방전측정이 가능함을 나타낸다.

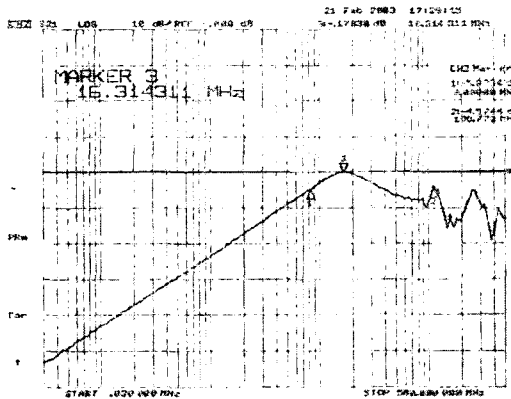


그림 2. 105pF CC 소체의 주파수 응답특성
Fig. 2. Frequency response of 105pF CC element

각 소체의 내전압 파괴 특성 파악을 위하여 실리콘유 속에 그림1의 소체를 넣고 1kV/sec로 전압을 상승시켜 절연 파괴 수준을 파악한 결과 105pF CC 소체는 50kV 이상에서 연면섬락이 발생하였다. 이는 앞서 언급한 6.6kV급 80pF EMC의 요구 내전압 특성인 15kV·rms보다 3배 이상 높은 초기 성능을 지니는 것을 나타낸다.

소체의 부분방전 특성 파악을 위하여 연면방전이 발생되지 않게 실리콘유 속에다 넣고 차폐실에서 실험을 실시하였다. 소체에 가해지는 인가전압은 교류 60Hz로 1kV/sec로 전압을 상승시켜 부분방전 발생을 파악하는 것으로 하였다. 부분방전 실험은 부분방전 측정기(NIHON model CD-5)로 부분방전 개시전압, 부분방전 크기 및 부분방전 소멸전압을

측정하였다. 측정 결과 105pF CC 소체의 부분방전 개시전압은 17kV로 나타났다. 또한 이 전압값에서 소체 내부의 부분방전이 아닌 연면방전의 특성을 지닌 것으로 나타났다. 이는 앞서 언급한 6.6kV급 80pF EMC의 요구 부분방전 특성인 8kV 전압 인가시 부분방전 발생량이 3pC 이하보다 2배 이상의 높은 부분방전 초기 성능을 지니는 것을 나타낸다. 각종 전기적 특성을 파악하기 위하여 사용된 시료는 5개 이상으로서 모두 ±5% 이내의 측정 결과를 보여 제조상품질도 균일한 것으로 나타났다.

3.3 CC 제작 및 특성 분석

105pF 소체를 이용하여 완성된 on-line 부분방전 측정용 CC의 형상을 그림 3에 나타내었다. 완성품은 높이 90mm, 큰 shed 최대 외경 70mm로 제작되어졌다. 제작시 소체 외부의 연면방전 방지를 위하여 고진공 속에서 탈기 후 에폭시로 molding하였으며, 공기중 외부 섬락을 고려한 누설거리를 고려하여 절연 구조를 설계하였다. 본 구조는 제작공정이 단순하여 저가격의 생산이 가능한 장점도 지니고 있다.

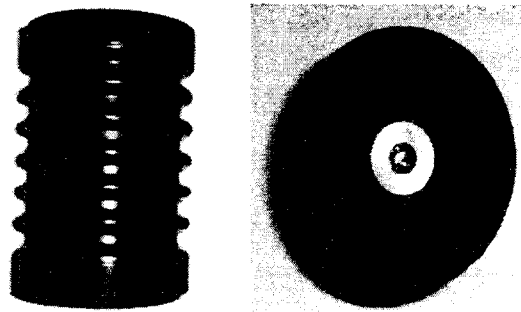


그림 3. 6.6kV급 on-line 부분방전 측정용 CC의 실물 사진
Fig. 3. Picture of 6.6kV class CC for on-line PD measurement

3.2항의 측정을 통하여 확인된 소체로 완성된 CC 제품의 주파수 응답 특성은 소체의 경우와 동일하게 나타났으며, 정상적인 완성품에서는 부분방전 특성 실험 결과 부분방전 개시전압이 20kV 이상으로 나타났다.

표 1. 6.6kV급 on-line 부분방전 측정용 CC의 유전전압 특성

Table 1. Tanδ -voltage response of 6.6kV class CC for on-line PD measurement

인가전압	# 1	# 2	# 3
2kV	0.24%	0.25%	0.20%
4kV	0.24%	0.25%	0.20%
6kV	0.24%	0.26%	0.20%
8kV	0.25%	0.26%	0.21%
10kV	0.25%	0.27%	0.21%

완성된 CC 제품 센서의 상용주파 운전시 유전손실 특성을 파악하기 위하여 schering bridge(Tettex type 2809A)로 인가전압을 상승시키며 측정된 유전정접 특성 결과를 표 1에 나타내었다. 완성된 제품의 유전정접 특성시험 결과에 의하면, 전압 상승에 따른 유전정접의 의존성이 미약하며, 전체 제품의 운전전압에서의 유전정접 값이 0.25% 이하로 사용상 충분히 만족하는 것으로 나타났다.

완성된 CC 제품 센서의 외부는 에폭시 수지로 성형되어 있고 옥내에 설치되어 이용될 센서이므로, 상용주파 건조 섬락전압 시험을 ANCI C29.11 8-2에 따라 시료 2개에 대하여 실시하였다[12]. 이에 따라 시험된 결과는 표 2에 나타낸 것과 같이 보정된 건조 섬락 전압치는 46kV로 나타났으며, 나머지 시료도 동일한 결과로 나타났다. 이는 선로에서 발생 가능한 이상전압의 크기보다 훨씬 높으므로, 차단기 등의 동작에 따른 이상전압에 대하여도 충분히 안전함을 나타낸다.

표 2.. 6.6kV급 CC의 상용주파 건조 섬락전압 시험 결과
Table 2.. Ac flashover voltage in dry condition of 6.6kV class CC

회 수	시험결과 [kV]	평균섬락 전압	시험조건 및 보정결과
1	43.5	- 최대치 및 최소치 버리고 5회에 대한 평균 $(45+43.5+43.5+45+43.5)/5 = 44.1\text{KV}$	기후 : 1,012hPa, 24.4℃. 30.1% 표준대기조건으로 보정한 대기보정계수 $K_t=k_1 \times k_2 = 0.984 * 44.1\text{kV}/0.984 = 46\text{kV}$ (표준대기조건보정 섬락전압)
2	45.0		
3	43.5		
4	43.5		
5	45.0		
6	43.5		
7	45.0		

4. 6.6kV급 CC의 장기 안정성 평가

본 연구를 통하여 개발된 그림 3의 CC에 대한 센서의 품질 신뢰성을 보증하기 위한 장기 안정성 평가를 위하여 장기 가속 열화 모델을 수립하였다. 장기 안정성 평가는 기계적 진동, 열적 열화 및 전기적 열화를 고려하였다.

4.1 장기안정성 평가법 설정

기계적 진동은 IEEE Std 275-1992에 언급된 회전기의 열적수명 평가에서 고려되는 주기적 기계적 진동 조건인 60Hz/0.2 또는 0.3 mm(1.5 중력 가속도)로 1 시간 동안 진동을 인가하는 조건을 반복하는 것으로 하였다[6]. 회전기의 열적수명 평가시 인가되는 기계적 진동 주기는 10 - 20 주기 사이이나, 본 연구에서는 113회의 진동 주기를 그림 4와 같이 진동 테이블 위에서 실시하였다. 또한, 기계적 진동 55주기 실시된 시료에다, 기계적 진동 중간에 열적 열화 및 열충격을 모의하기 위하여 180℃로 유지된 항온조에 3시간을 넣은 후 상온에다 방치하는 것을 한 주기로 하여 16회 실시하였다.

전기적 열화는 13kV의 전압으로 1500 시간 인가하였다.

장기 안정성 평가에 이용된 시료는 최종 개발과정에서 제작된 15개 시료 중 에폭시 성형과정중 소체와의 계면에서 기포 발생 등으로 부분방전 특성이 낮게 나타난 시료 3개에 대하여 실시하는 것으로 하였으며, 가속 열화 중에 부분방전 개시전압 및 유전정접 특성을 측정하였다. 실험에 이용된 센서 중 센서 A 및 센서 C는 부분방전 개시전압이 14kV로 나타난 시료이며, 센서 B는 부분방전 개시전압이 9kV로 나타난 시료로서 그림 3과 같은 최종품 제작과정에서 초기 특성이 제일 나쁘게 나타난 시료이다.



그림 4. 6.6kV급 CC의 진동시험 상태

Fig. 4. Vibration test of 6.6kV class CC

4.2 실험 결과 및 고찰

4.2.1 기계적 및 열적 안정성 평가

센서 A 및 B를 대상으로 113회의 기계적 진동 주기가 인가되었다. 또한, 기계적 진동 55 주기부터는 기계적 진동 중간에 열 충격을 16회 실시하였다. 그림 5를 통하여 부분방전 개시전압 특성을 고찰하면, 초기 상태의 부분방전 개시전압은 14kV 및 9kV였으나, 113회의 기계적 진동시험 및 16회의 열충격 시험 후에도 두 시료 모두 7kV 근처의 부분방전 개시전압을 유지하고 있는 것으로 나타났다.

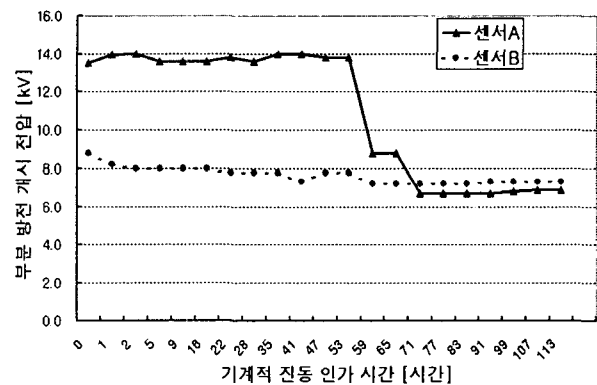


그림 5. 6.6kV급 CC의 장시간 진동-부분방전 특성

Fig. 5. Vibration-PDIV characteristic of 6.6kV class CC

그림 6을 통하여 유전정접 전압 특성을 고찰하면, 초기 상태의 유전정접 값은 0.25% 근처로 나타났으나, 99회의 기

계적 진동시험 및 14회의 열충격 시험 후에는 두 시료 모두 0.1% 이하의 유전정접 값이 나타났으나, 113회의 기계적 진동시험 및 16회의 열충격 시험 후에는 유전정접 값이 증가되는 것으로 나타났다. 이는 향후 그림 10으로 설명될 세라믹 소체가 지나는 민감한 온도 특성 및 제품 안정화와 상관성이 있는 것으로 판단되어진다.

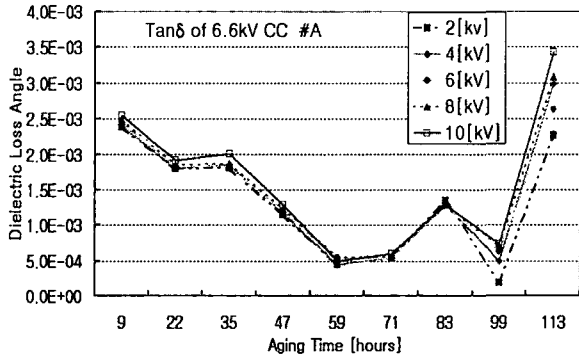


그림 6. 6.6kV급 CC의 장시간 진동-유전정접 특성
Fig. 6. Vibration-tanδ characteristic of 6.6kV class CC

4.2.2 전기적 안정성 평가

기계적 및 열적 안정성 평가를 위하여 사용된 센서 시료 A 및 B 중에서 A 시료는 파괴분석용으로 이용하고, 열화 시료 B 및 새로운 시료 C를 가지고 전기적 안정성을 평가하기 위하여 시료 양단에 13kV의 전압을 인가한 상태에서 1500 시간을 유지시켰다. 전압 가속 열화에 따른 안정성을 평가하기 위하여 초기상태, 인가 중간 상태 및 최종 시점에서 부분방전 및 유전정접 시험을 실시하였다. 기계적·열적 열화를 인가하지 않은 C 시료의 경우는 부분방전 개시전압보다 낮은 전압이 인가되었으나, 기계적·열적 열화 과정을 마친 B 시료는 부분방전 개시전압보다 높은 전압이 인가되었다.

그림 7을 통하여 부분방전 개시전압 특성을 고찰하면, 초기 상태의 부분방전 개시전압은 14kV 및 7.2kV였으며, 1500 시간의 13kV 전압열화 후에도 두 시료 모두 동일한 부분방전 개시전압을 유지하고 있는 것으로 나타나, 가속전압 장기 인가 후에도 부분방전 열화의 성장이 없는 것으로 나타나 매우 안정적인 것으로 평가된다.

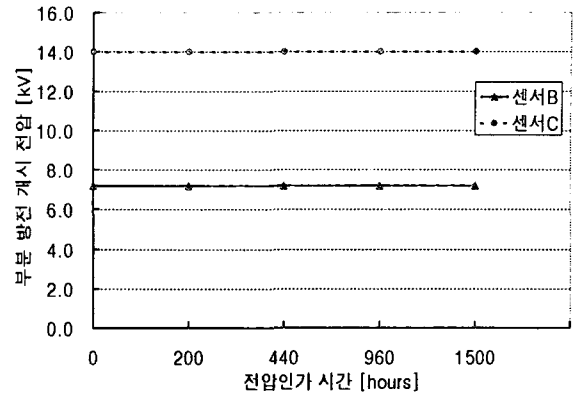


그림 7. 6.6kV급 CC의 장시간 전압열화-부분방전 특성
Fig. 7. Voltage aging-PDIV characteristic of 6.6kV class CC

그림 8을 통하여 유전정접 전압 특성을 고찰하면, 기계적·열적 열화를 진행한 시료인 B의 유전정접 값은 열화 960시간까지 증가 현상을 보이다 안정화되는 것으로 나타났다. 반면, 열화되지 않은 C 시료의 초기 유전정접 값은 A 및 B 시료의 기계적·열적 열화전 초기 상태의 유전정접 값과 같은 0.25% 근처로 나타났으나, 열화 960시간까지는 미세한 증가 현상을 보이다 낮아지는 현상으로 나타났다. 1500 시간의 13kV 전압열화 후에도 두 시료 모두 유전정접 값이 초기상태에 비하여 큰 증가없이 나타나 매우 안정적인 것으로 평가된다.

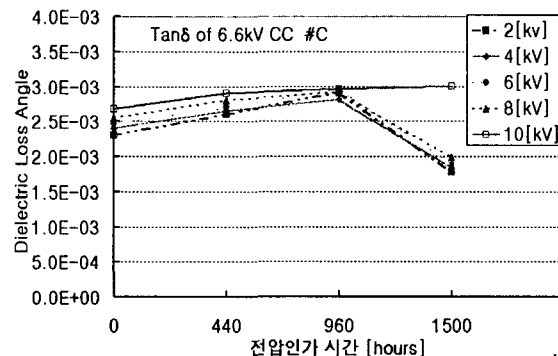
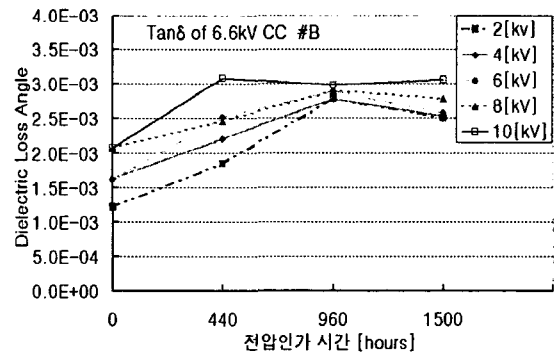


그림 8. 6.6kV급 CC의 장시간 전압열화-유전정접 특성
Fig. 8. Voltage aging-tanδ characteristic of 6.6kV class CC

4.2.3 전기적 열화 수명 평가

전기적 열화를 표현하는데 이용되는 과전수명 식(2)를 통하여 센서에 인가된 전압으로부터 운전 중인 조건에서의 수명을 도출하기 위하여는 센서에 사용된 유전율이 300 근처인 주성분이 SrTiO3인 세라믹 유전체와 에폭시 절연물의 수명지수 n 을 파악하여야한다. 에폭시 절연물의 경우는 수명지수 n 이 6-12 근처의 값으로 나타난 연구결과가 있으므로, 수명지수 n 을 최소값인 6으로 선정하였다[9,10]. 세라믹 유전체의 경우는 수명지수 n 과 관련된 자료가 발표된 것이 없는 관계로 EIA/IS-692에서 제시된 가속수명 시험조건을 반영하기로 하였다[13]. EIA/IS-692에서는 2배의 운전전압에서 1000시간을 만족하는 것을 수명조건으로 요구하며, 이를 운전수명 20년 상당으로 보고있으므로, 이로부터 식(2)를 이용하여 수명지수를 역으로 산출하면 다음과 같이 계산되어져 n 은 7.45로 나타났다.

$$(V_2/V_1)^n = T_1/T_2$$

$$(2)^n = (20 \times 365)/(1000/24)$$

본 연구의 실험에서는 2 종류의 절연재료가 복합으로 사용되어지므로, 수명지수를 선정함에 있어서 적은 값을 기준으로 하고 여기에 시험상 안전을 20%를 감안하기로 하였다. 이렇게 선정된 수명지수 n 은 4.8이다.

수명지수 4.8을 이용하여 개발된 센서의 운전전압에서의 수명은, 13kV의 전압을 인가한 상태에서 1500 시간을 고려하여 계산하면, 다음과 같이 계산되어져 62년으로 나타났다.

$$(V_2/V_1)^n = T_1/T_2$$

$$(13/3.81)^{4.8} = T_1/\{1500/(24 \times 365)\}$$

최소 조건을 상정한 전압열화 수명 계산에서도 기계적·열적 열화와 관계없이 모두 60년 이상의 수명에서도 파괴가 발생되지 않는 것으로 나타났다.

4.2.4 장기 안정성 종합 평가

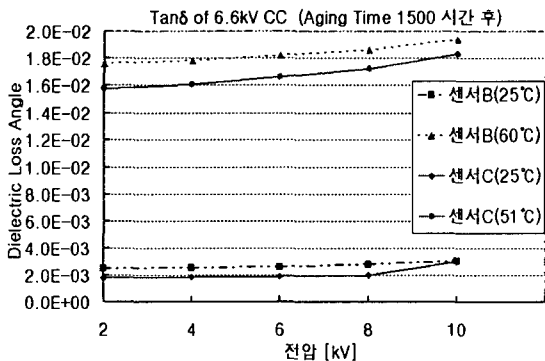


그림 9. 6.6kV급 CC의 1500시간 전압열화 후 전압-유전정점 특성

Fig. 9. Voltage-tanδ characteristic of 6.6kV class CC after 1500 hours aging

앞서 설명된 그림 6 및 그림 8의 유전특성을 고찰하기 위하여, 1500시간의 전압 열화후 시료를 대상으로 상온 및 운전중 센서가 취부될 지점의 최고 추정 온도인 55℃ 부근에서의 유전정점 특성을 파악하였다. 온도 변화 및 전압에 대하여 유전정점 변화를 나타낸 것이 그림 9와 그림 10이다. 이 실험 결과에 의하면 사용된 세라믹 소재는 온도에 매우 민감한 특성을 지니는 것으로 나타났으며, 전압변화에 의한 영향은 적은 것으로 판단되어진다.

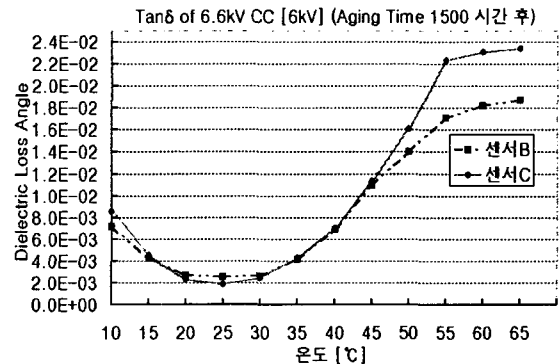


그림 10. 6.6kV급 CC의 1500시간 전압열화 후 온도-유전정점 특성

Fig. 10. Temperature-tanδ characteristic of 6.6kV class CC after 1500 hours aging

그림 9 및 10의 결과를 토대로 기계적 및 열적 안정성 평가를 실시한 그림 6에서 나타난 유전정점 값이 낮게 측정된 진동주기 44회부터 99회까지의 결과를 검토하면, 동결기로서 측정시 실온이 상대적으로 낮은 영향이 있는 것으로 판단되나, 이의 영향 보다는 제품 안정화와 상관성이 높은 것으로 판단된다. 이는 1500시간 전압 가속열화 후에 나타난 2 시료의 유전정점 값이 20-30℃부근에서 최소 값을 나타내며, 이 값도 0.2%를 초과하는 것으로 판단되어진다.

전기적 안정성 평가 후의 유전정점에서도 두 시료 모두 유전정점 값이 초기상태에 비하여 큰 증가없이 나타나 매우 안정적인 것으로 평가된다.

부분방전 개시전압을 통하여 장기 안정성을 고찰하면, 기계적 진동에 의하여 부분방전 발생원의 성장 가능성은 확인되어지나, 1500 시간의 전압열화 후에도 두 시료 모두 동일한 부분방전 개시전압을 유지하고 있으므로 전압열화에 의한 부분방전 열화의 성장이 없는 것으로 나타나 매우 안정적인 것으로 평가된다.

전기적 열화수명 평가결과에서, 최소 조건을 상정한 전압 열화 수명 계산에서도 기계적·열적 열화와 관계없이 모두 60년 이상의 수명에서도 파괴가 발생되지 않는 것으로 나타나, 현장 적용상 문제가 없는 것으로 사료된다.

5. 결론

본 논문에서는 6.6kV급 권선형기인 전동기의 고정자 권선 및 몰드변압기의 고압권선에서 발생하는 부분방전을 on-line으로 측정하여 절연열화 진단에 이용하고자, 고전압용 ceramic coupler(CC)를 제작하여 센서로서의 특성 및 운

전중 장기사용 안정성을 입증하기위한 실험 및 전기적 열화 수명 평가를 실시한 결론은 다음과 같이 나타났으며, 종합적 결론은 현장 적용상 상당한 신뢰성의 부여가 가능한 것으로 판단되어진다.

1. 세라믹 재질을 이용한 105pF 소체는 주파수 응답특성, 부분방전 개시전압, 유전정점 및 건조섬락 전압을 실시한 결과 초기 성능이 매우 우수한 것으로 나타났다.
2. 운전중 장기사용 안정성을 평가하기 위한 기계적 및 열적 복합실험에서도 장기사용상 안정적인 특성을 지니는 것으로 나타났다.
3. 전기적 열화수명 평가결과 최소 조건을 상정한 전압열화 수명 계산에서도 기계적·열적 열화와 관계없이 모두 60년 이상의 수명이 산출되어졌다.

참 고 문 헌

- [1] 강동식 외 “고압 회전기 On-line 부분방전 측정용 Ceramic Coupler 특성”, 대한전기학회지, Vol. 51C, No. 5, pp. 205-212, 2002.
- [2] I.M. Culbert, H. Dhirani and G.C. Stone, “Handbook to Assess the Insulation Conduction of Large Rotating Machines (Volume 16)”, EPRI publication EL-5036, 1989.
- [3] IEEE Std 1434-2000, “IEEE Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery”, Aug. 2000.
- [4] Ken Kimura, Yoshiharu Kaneda, Koji Mio, Satoru Kuroki, Teruya Osawa and Hiroki Tanaka “On-line Partial Discharge Monitor for Turbine Generator”, Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering 1999 (ICEE '99), Vol. 1, pp. 172-175, 1999.
- [5] Dong-Sik Kang, Jong-Ho Sun, Yong-Joo Kim, “On-Line Partial Discharge Measuring Techniques of Mold Transforme”, KJ 2003.
- [6] IEEE Std 275-1992, “IEEE Recommended Practice for Thermal Evaluation of Insulation Systems for Alternating-Current Electric Machinery Employing Form-Wound Pre-insulated Stator Coils for Machines Rated 6900V and Below”.
- [7] IEC 60034-18-31-1996, “Test procedure for form-wound windings-Thermal evaluation and classification of insulation systems used in machines up to and including 50 MVA and 15kV”.
- [8] T. W. Dakin et al, “The Voltage Endurance of Cast Resin”, Proc. IEEE International Conference on Electrical Insulation, No. 216. 1973. 06.
- [9] 井關 他, “絶縁の電壓劣化に関する考察”, 電氣學會全國大會, No. 277, 1982.
- [10] 電氣學會, “絶縁システム複合要因劣化に関する研究の現状”, 電氣學會技術報告(II部) 第225号, 1986.
- [11] H. Zhu, V. Green, M. Sasic and S. Halliburton, “Increased Sensitivity of Capacitive Couplers for

In-Service PD Measurement in Rotating Machines”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 4, December 1999.

- [12] ANCI C29.11, “Composite Suspension Insulators for Overhead Transmission Lines-Tests”, 1996.
- [13] EIA/IS-692, “Ceramic Capacitor Qualification Specification”, 1996.

저 자 소 개



강 동 식 (姜 東 植)

1956년 10월 13일생. 1983년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1987년~현재 한국전기연구원 부분방전진단기술팀장 책임연구원.
Tel : 055-280-1573, Fax : 055-280-1547, E-mail : dskang@keri.re.kr



김 용 주 (金 容 柱)

1975년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 미국 R.P.I. 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1979년~현재 한국전기연구원 책임연구원. 1999년~2000년 산업전기연구단 단장. 2001년~현재 산업전기연구단 전문위원. 2001년~현재 대한전기학회 이사.
Tel : 055-280-1540, Fax : 055-280-1547, E-mail : yjkim@keri.re.kr



윤 영 호 (尹 英 浩)

1964년 1월6일생. 1985년 명지대학교 요업공학과 졸업(학사). 1992년 동 대학원 무기재료공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 무기재료공학과 졸업(박사). 1986년~2001년 삼화콘덴서 연구소 근무. 2001년~2004년 주식회사 파워플러스 대표이사, 2004년 현재 동우전기공업(주) 상무이사
Tel. : 031-611-8000, Fax. : 031-611-8004 E-mail : yhyun@dwctpt.co.kr.