

## HFCT를 이용한 HTS 변압기에서의 인위적 결함에 대한 부분방전 측정

신우주\*, 박태건\*, 이상화\*, 구자윤\*, 이방욱\*  
한양대학교\*

### Partial discharge measurement of artificial defects applying HFCT sensor for HTS transformer

Woo-Ju Shin\*, Tae-Gun Park\*, Sang-hwa Lee\*, Ja-yoon Koo\*, Bang-wook Lee\*  
SMDT Lab, Dept. of Electric Engineering, Hanyang University\*, KOREA

**Abstract** - 고전압 대전력 기기인 고온초전도(HTS) 변압기는 기기내의 불순물과 작은 결함에서 발생하는 부분방전이 장시간 지속되어 심각한 고장으로 발전한다. 그러므로 기기의 고장을 미연에 발견하고 예방할 수 있는 다양한 진단 기술이 확립되어야 한다. 본 논문은 기존의 변압기내 절연유에서 발생될 수 있는 다양한 결함 중 기포, 돌기, 권선과 권선사이, 자술금속 이물질 이렇게 4가지 타입의 모의결함을 제작하여 실험 하였다. 기존의 전력설비 부분방전 진단 시 사용되는 IEC60270 규격으로 실험하여 측정된 데이터 바탕으로 Labview program을 이용하여 자체 개발한 PRPD 분석 프로그램과 오실로스코프를 연동하고 HFCT 센서를 이용하여 취득한 데이터를 비교 분석하였다. 그 결과 IEC60270 측정데이터와 Labview 프로그램을 이용하여 나온 결과 값이 유사하게 나왔다는 것을 알 수 있었다.

#### 1. 서 론

고온 초전도 전력기기인 초전도 케이블, 초전도 변압기, 초전도 한류기는 송배전 시스템의 용량 및 효율 향상, 그리고 신뢰성 개선에 있어서 21세기 핵심기술이 될 잠재력을 가지고 있다.

그 중 HTS (High Temperature Superconducting) 변압기는 기존에 사용하고 있는 변압기 보다 부피와 무게를 줄일 수 있는 동시에 과부하 용량을 증가시킬 수 있으며 환경 친화적인 장점을 지니고 있다. 따라서 전 세계적으로 고온 초전도체를 사용한 초전도 변압기는 현재 실험실 연구 수준을 벗어나 실용화를 목전에 두고 있다.

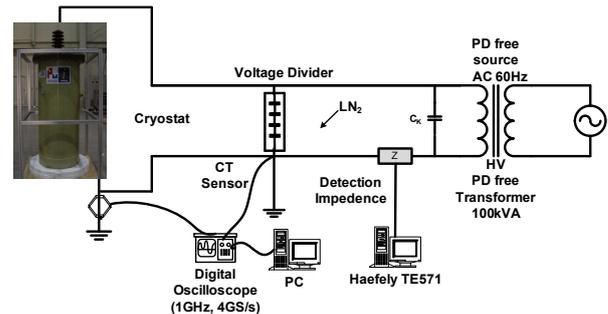
고온초전도변압기는 기존에 운전중인 변압기와 마찬가지로 구조적으로 복잡하며 밀폐된 구조로 이루어져 있어 이상 발생 시 즉각적인 관측을 통한 이상유무를 판별 할 수 없어 기기 이상의 징후를 계속할 수 있는 설비 및 진단기술이 반드시 필요하다. 또한 초전도 전력기기는 -203°C(77켈빈)의 액체질소를 사용하고, 고전압에 상대적으로 취약한 초전도체를 사용함으로 인하여, 이상 징후의 신속한 파악 및 대처를 위한 진단 기법이 반드시 확립되어야 한다. 하지만 초전도 전력기기에 대한 부분방전 진단기법은 현재 전 세계적으로 연구 초기단계에 있다[1].

본 연구에서는 고온초전도변압기내에서 발생 될 수 있는 사고 원인 및 고장 결함인 절연체로 자체의 결함, 도체 모서리 부분, 기포 및 금속가루 및 불순물 환입, 금속 철다나 도체 연결 불량 등과 같은 결함들을 모의하여, 발생하는 부분방전 신호에 대해서 기존 전력설비 PD(Partial discharge)진단시 사용되는 통계적 데이터 처리 알고리즘인 PRPDA(Phase Resolved Partial Discharge Analysis)를 적용하였다[2]. 이 방법 부분방전 펄스가 발생되면 인가전압의 위상구간을 일정한 수로 나누어 각 구간에서 발생된 부분방전을 모두 중첩시켜서 방전의 크기, 위상, 그리고 펄스 수들을 주요한 측정 파라미터로 고려하였다. 이러한 부분방전 분석을 통한 데이터들은 고온초전도 변압기뿐만 아니라 초전도 전력기들의 설계용 적용 시에 고장진단시스템 구축의 데이터베이스로 활용 가능하며 초전도 전력기기의 냉매로 사용되는 액체질소의 절연특성을 파악함으로써 초고압 초전도 전력기기 절연 설계 자료로 활용할 수 있을 것이다[3].

#### 2. 본 론

##### 2.1 실험 장치 구성

본 연구를 위한 실험장치의 개략도는 <그림 1> 과 같다. 실험에 사용된 액체질소 용기인 냉동기는 내부 지름 40[cm], 높이 130[cm]인 GFRP(Glass Fiber-Reinforced Plastics) 용기로 열의 침입을 막기 위하여 진공으로 된 열절연층으로 구성되어 있으며 상부인 플랜지에는 동기 연결부, 진공 배기구 및 고전압을 인가할 수 있게 70[kV] 급 Epoxy Busing이 설치되어 있다. 모의결함 셀에서 발생하는 누설전류를 HFCT 센서(High Frequency Current Transformer, 2-25[MHz])로 검출하여 오실로스코프 (Lecroy LC547AL, 1[GH]~2[Gs/s])로 데이터를 측정,



<그림 1> 부분방전 실험 셋팅 개략도

NI™-GPIB)을 통해 컴퓨터에 설치된 Labview 프로그램으로 부분방전 패턴을 분석 저장하였다. 시험용 변압기 (HAEFLEY, PD Free Test Transformer, 100[kVA])를 이용하여 인가하였으며 냉동기 내부에 설치된 결함 (기포, 돌기, 권선과 권선사이, 자술금속 이물질)로부터 발생된 부분방전 신호들은 IEC60270 에 부합하는 HAEFLEY TE571™을 통해 분석 하였다.

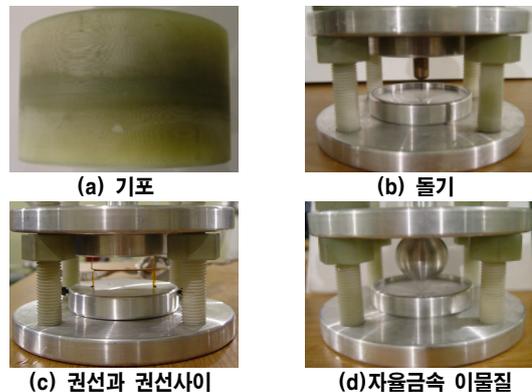
##### 2.2 냉동기에 설치된 결함

**기포:** 고체절연물인 GFRP 내부에 이물질이 들어가게 되면 지속적인 열팽창 및 수축이 진행되면서 절연결함이 커져 절연성능을 저하시킬 수 있다. <그림 2(a)>는 지름 15[cm], 두께 6.5[cm], 인 GFRP내에서 지름 5[mm], 두께5[mm] 알루미늄 조각 삼입 전극간 거리 3.5[cm] 제작 되었다[4].

**돌기:** 오크라 바늘의 곡률반경은 100[μm], 길이 5[cm], 갭 간격 5[mm]로 설치된 고정 돌출부는 <그림 2(b)>에서와 같이 일정 크기의 바늘을 고압도체에 부착, 도체 가공 시에 발생될 수 있는 금속이물과 돌기를 모의 하였다.

**권선과 권선사이:** <그림 2(c)>와 같이 초전도 선체를 대신하여 캡톤필름(25[μm]×10[mm])으로 3회 코팅된 구리선체(0.3[mm]×4[mm])을 사용하여 권선과 권선사이 에 대한 연면방전을 모의 하였으며, 권선간 사이 이물질이 존재 시에 대한 복합결함에 대해서도 모의 하였다[3].

**자술금속 이물질:** <그림 2(d)>는 1.5[Φ] 구형 알루미늄으로 HTS 변압기 내부에서 발생될 수 있는 하전 입자를 모의하기 위해 구형 알루미늄을 가공하여 실험하였다. 하전입자 또한 액체질소 상에서 유동하다. 권선과 권선사이에 부착 되면서 전계 집중을 유발하거나 내부도체에 접근하게 되어 절연파괴로 이어질 수 있다.

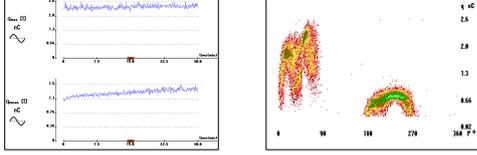


<그림 2> 4가지 종류의 모의결함

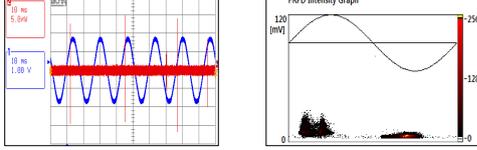
**2.3. 냉동기 내부의 인위적 결함 별 부분방전 패턴 분석**

**(1)기포**

<그림 3,4>는 기포에서의 부분방전 패턴을 각각 IEC60270 및 HFCT 센서로 측정된 결과이다. 15[kV]에서 최고 부분방전이 2[nC]~2.6[nC] 정도의 매우 큰 방전이 검출 되었으며, 시간이 지날수록 방전의 qmean 값은 1.1[nC] 이하에서 1.5[nC] 으로 증가하는 추세를 보였다. 30분 동안 누적된 PRPD 패턴은 0° ~ 80° 및 170° ~ 280° 부근에서 주로 발생되었다. 정극성과 부극성에서의 방전 패턴을 비교하였을 때 정극성에서 방전 펄스가 더 많이 발생하였다.



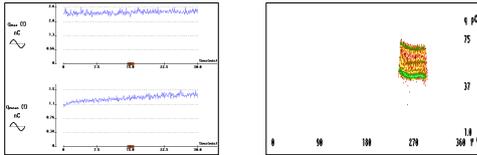
**qmax, qmean 변화도**  
**PRPD 패턴**  
**<그림 3> IEC60270 방법으로 측정된 내부기포 방전패턴**



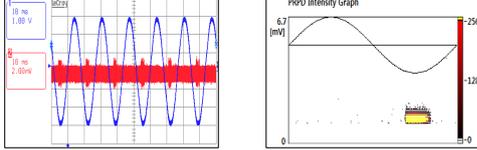
**HFCT의 응답**  
**PRPD 패턴**  
**<그림 4>HFCT 센서로 측정된 내부기포 방전패턴**

**(2)돌기**

<그림 5,6>은 돌기에서의 부분방전 패턴을 각각 IEC60270 및 HFCT 센서로 측정된 결과이다. 4.7[kV] 낮은 전압에서 방전 크기가 초기 인가 시 보다 감소하여 50[pC] 정도의 균일한 크기의 방전이 270° 인 부극성 부근에서 발생됐다.



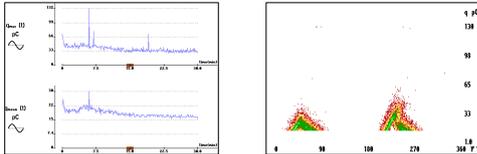
**qmax, qmean 변화도**  
**PRPD 패턴**  
**<그림 5> IEC60270 방법으로 측정된 돌기 방전패턴**



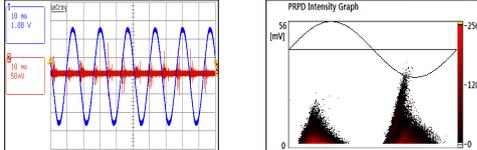
**HFCT의 응답**  
**PRPD 패턴**  
**<그림 6> HFCT 센서로 측정된 돌기 방전패턴**

**(3)권선과 권선사이**

<그림 7,8>은 권선과 권선사이의 부분방전 패턴을 각각 IEC60270 및 HFCT 센서로 측정 결과이다. 권선과 권선간에 접촉면적에 따라 방전의 크기 및 방전 패턴이 다른 양상을 보인다. 인가전압 11[kV] 상에서 거의 39[pC]~55[pC]로 일정하게 위상 30° ~ 110°, 190° ~ 280°에서 방전이 발생했으며 PRPD 데이터로 패턴을 보았을 때 기포방전과 다른 양상의 패턴을 얻을 수 있었다.



**qmax, qmean 변화도**  
**PRPD 패턴**  
**<그림 7> IEC60270 방식으로 측정된 권선과 권선사이 방전패턴**

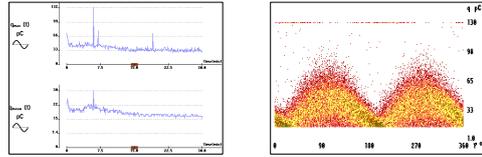


**HFCT의 응답**  
**PRPD 패턴**  
**<그림 8> HFCT 센서로 측정된 권선과 권선사이 방전패턴**

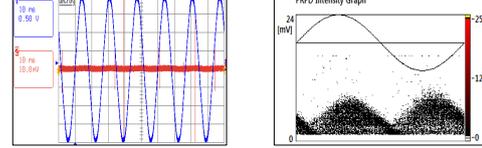
**(4)자율금속 이물질**

<그림 9,10>은 자율금속 이물질에서의 부분방전 패턴을 각 IEC60270

및 HFCT 센서로 측정된 결과이다. 자유 하전입자는 입자의 크기와 매질 그리고 전계 크기에 매우 민감하게 반응하여 방전 개시전압이 일정하지 않으며 너무 큰 전계가 인가되면 전계가 작은 쪽으로 하전입자가 이동하여 더 이상 방전이 발생하지 않는 경우도 있다. 인가전압 15[kV]에서의 자율금속 이물질의 부분방전 펄스의 크기는 불균일하게 변화하였으며 모든 위상에서 부분방전 펄스가 산발적으로 발생하였다.



**qmax, qmean 변화도**  
**PRPD 패턴**  
**<그림 9> IEC 60270 방법으로 측정된 자율금속 이물질 방전패턴**



**HFCT의 응답**  
**PRPD 패턴**  
**<그림 10> HFCT 센서로 측정된 자율금속 이물질 방전패턴**

상기 4가지 종류의 모의결함을 부분방전 검출기로 측정 하였으며 [표 1]과 같이 각 결함별 부분방전 특성을 보여주었다.

**<표 1> 부분방전 테스트 결과**

결함	인가전압	PD	Phases
A. Void	15[kV]	2~2.6[npC]	0°~ 80° 170°~ 280°
B. Protrusion	4.7[kV]	45~75[pC]	270°
C. Turn to Turn	11[kV]	39~55[pC]	30°~110° 190°~280°
D. Free moving particle	15[kV]	39~55[pC]	0°~360°

**3. 결 론**

본 연구에서는 액체절소를 절연매질로 사용하는 HTS 변압기 내부에서 발생 가능한 인위적 결함에 대한 부분방전 특성을 살펴 보았으며 다음과 같은 결과를 도출 하였다.

- 기포의 경우 초기 발생된 부분 방전 크기보다 시간이 지날수록 방전이 커지는 양상을 보였다.
- 돌기의 경우 초기 보다 어느 정도 시간 후에 일정한 방전 크기를 보였다.
- 권선과 권선사이의 경우 방전펄스의 발생 위상은 기포와 같은 양상을 보였지만 크기 및 PRPD 패턴에서 두드러진 차이를 보였다.
- 자율금속 이물질의 경우 전위상에서 산발적으로 방전신호가 발생하는 것을 볼 수 있었다.

앞으로의 연구 계획은 현재 전력기기 진단에 적용되고 있는 UHF(Ultra High Frequency) 센서, 초음파 센서 및 온도 센서에 대한 초전도 전력기기에 적용 가능성에 여부에 대해서 연구를 진행 할 예정이다.

**감사의 글**

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용 기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행 되었습니다.

**[참 고 문 헌]**

[1] F. Gutfleish and L. Niemeyer, "Measurement and simulation of PD in epoxy voids," IEEE Trans. Dielectrics EL, Vol. 2, no.5, pp. 729-743, Oct 1995.

[2] D.R. James, I. Sauers et al., "Breakdown and partial discharge measurements of some commonly used dielectric materials in liquid nitrogen for HTS applications", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 17, NO.2, June 2007

[3] N. Hayakawa, M. Nagino et al., "Dielectric Characteristics of HTS Cables Based on Partial Discharge Measurement", IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol. 15, No. 2, June 2005.

[4] F. Gutfleish and L. Niemeyer, "Measurement and simulation of PD in epoxy voids," IEEE Trans. Dielectrics EL, Vol. 2, no.5, pp.729-743, Oct 1995.