

전자파 부분방전 측정장치

KSC3700 규격 해설과 IEC규격동향

김 광 화 / 한국전기연구원 책임연구원

1. 서 론

국내의 부분방전 측정기술은 1981년 한국전기연구원의 고전압시험실에 부분방전 측정장치(Robinson ERA type 700)가 도입되면서 기술개발이 시작되었다고 사료된다. 처음에는 이 기술이 국내 중전기기 제품개발에 적용되어 중전기기 제품의 품질향상에 크게 기여하였으며 또한 국내에 부분방전의 기술을 알리고 연구를 유도하는 계기가 되었다. 이 때 부분방전시험에 적용된 규격은 IEC270(현재 IEC60270)이었으며, 이 규격에서는 부분방전의 용어정의와 부분방전 측정장치의 규정, 부분방전 시험회로 및 부분방전량 교정방법 등이 기술되어 있다.

부분방전 측정 및 분석기술은 전력기기의 결함을 알 수 있는 진단기술로 활용이 가능하므로 운전 중인 전력기기의 고장의 예방이 가능하지만, 주변 환경의 제약과 잡음으로 부분방전 측정이 어렵기 때문에 IEC60270에서 시험표준으로 하고 있는 커플링 커패시터형의 부분방전측정기술의 적용에 많은 제약이 있다. 그래서 전력기기의 운전 중 부분방전 측정에서 잡음의 영향을 적게 받을 수 있고 환경적인 제약이 적은 전자파 방식이 해외에서 1980년대부터 연구와 개발이 되기 시작하였으며, 그 중에서도 UHF 방식으로 GIS에서 운전 중에 부분방전을 측정할 수 있는 기술이 영국의 DMS Co.에서 처음 개발되어 실용화 수준에 이르렀다.

이 제품은 1998년 한국전력의 8개 변전소에 도입되어 운영되기 시작되면서 국내의 관련 연구자, 개발자 및 사용자들이 관심을 갖게 되었으며, 국내기술로 개발되기 시작하였다. 이 기술이 개발되면서 사용자와 개발자의 양측에 공통적으로 발생된 문제가 개발된 제품을 어떻게 성능을 평가할 것인가에 대한 것으로 표준적인 방법의 제정을 사회적으로 요구하였다.

따라서 한국전기연구원에서는 산업자원부 표준화 기술개발사업의 일환으로 "On-line 부분방전 측정기술의 시험평가방법(2005. 6 ~ 2007. 5)" 과제를 수행하여 운전 중 부분방전의 대표적인 측정장치인 '전자파 부분방전 측정장치의 규격(KSC3700)' 과 '음향방출 부분방전 측정장치의 규격(KSC3701)' 을 제정하였다.

국제적으로는 IEC TC 42 WG 위원회에서 부분방전 측정관련 규격을 관장하고 있으며 IEC60270을 제정하고 수정하여 국제적으로 사용되고 있다. 현재는 IEC62478을 제정 중에 있는 것으로 파악되고 있다. 본고에서는 전자파 부분방전 측정장치 규격인 KSC3700을 중심으로 설명하고 IEC 관련 규격인 IEC60270과 IEC62478에 대해서도 동향을 간단히 설명하고자 한다.

2. 전자파 부분방전 측정장치 KSC3700 규격 해설

2007년도에 제정된 KSC3700 규격은 본문과 해설서로

구성되어 있으며, 본문에서 본 규격의 적용범위를 “이 규격은 운전 중인 전력기기의 진단을 위하여 전자파 부분방전 측정장치의 특성을 평가하는 방법을 작성한 한국산업규격이다.”라고 서문에 규정되어 있다. 이하에서는 본 규격을 작성할 때 근거가 된 규격과 자료를 바탕으로 해설하였다.

가. 규격의 구성요소

본 규격(안)은 서문, 적용범위, 인용규격, 용어의 정의, 측정방법 및 측정장치, 시험장비, 부분방전 측정장치의 평가, 부분방전 측정장치의 시험, 교정용 펄스신호 발생기의 시험과 특성유지, 부분방전 데이터 기록과 저장으로 구성하는 것으로 하였으며, 여기서 중요 항목인 측정방법 및 측정장치, 시험장비, 부분방전 측정장치의 평가, 부분방전 측정장치의 시험, 부분방전 데이터 기록과 저장에 대해서 구체적인 내용으로 구성하는 것으로 하였다.

- 측정방법 및 측정장치에서는 전자파 센서의 임피던스, 반사계수, 유효높이, 부분방전량에 대한 감도에 대한 측정방법과 측정장치 그리고 앰프의 증폭 및 주파수 측정방법에 대해서 기술하는 것으로 하였다.
- 시험장비에서는 오실로스코프, 스펙트럼분석기, 광대역 TEM/GTEM Cell, 교정용 펄스신호발생기에 대해서 규정하는 것으로 하였다..
- 부분방전 측정장치의 평가는 센서의 주파수 대역평가절차, 앰프의 주파수 대역 및 증폭을 특성평가절차에 대해서 설명하는 것으로 하였다..
- 부분방전 측정장치의 시험은 센서 및 앰프의 형식시험, 검수시험에 대해서 규정하는 것으로 하였다.
- 부분방전 데이터의 기록과 저장은 부분방전의 데이터의 형태에 대해서 규정하는 것으로 하였다.

나. 센서의 특성평가

본 규격의 ‘4.2항’과 ‘4.3항’은 부분방전 측정에 사용될 센서의 특성평가를 위해서 센서의 입력 임피던스 및 반사계수, 유효높이 및 부분방전량에 대한 출력특성을 측정하는 것으로 하였다.

임피던스 측정법은 안테나 테스트 기준규격인 IEEE Std 149-1979를 기본으로 하고 전력기기에서의 설치조

건을 적용하였다. 센서의 출력단자에서 측정하며, 센서의 설치조건에 영향을 받기 때문에 실제 동작환경이나 그 동작환경이 모의된 곳에 설치하고 측정하여야 한다. 최근에는 전체 네트워크의 산란계수를 측정하는 광대역 주파수 스윙방식의 회로망분석기시스템을 이용한다. 이 방식에서 측정되는 값은 일반적으로 입력전압에 대한 출력전압의 비의 값으로 표시되며 전송케이블 50Ω을 기준으로 임피던스가 계산된다.

센서의 이득을 나타낼 수 있는 유효높이의 측정은 측정하기 위한 표준전자기장 E_r 을 발생시키고 평가하는 방법에 대해서 IEEE 1309-1996와, IEEE std c95.3-2002의 내용의 일부를 적용하였다. 여기서 표준전자기장 발생 및 평가법은 자유공간 표준 전자계법, 도파관법, 표준프로브 혹은 전달 표준법 등 세 가지로 분류되며, 대상주파수대역 및 설치환경에 따라 한 가지를 선택한다. 교정하고자 하는 센서가 교정되는 동안 전자계 발생기와 전달기는 요구되는 출력을 발생해야 하고 시간에 따라 변하지 않아야 한다. 또한 본 규격이 전력기기 취부상태의 센서성능을 검증하는 것이므로, 센서를 설치할 때는 실제 전력기기에 부착하는 방식이 반영되어야 한다. 그러므로 표준전자계 발생장치의 센서취부는 실 전력기기의 센서 취부 구조물 (전력기기의 관측창, 커버 등)과 비슷한 형태이어야 한다.

본 규격의 ‘4.4항’은 실 부분방전에서 센서의 감도를 측정하기 위해 일정한 방전량이 발생하는 결합셀을 만들어 센서의 감도를 측정한다. 측정용 표준 결합셀은 인가전압의 변화에 대하여 부분방전량이 크게 변하지 않고 계속적으로 일정한 방전량을 발생할 수 있는 것으로 하며 측정대상이 되는 기기에 직접 설치할 수 있는 구조이어야 한다. 그리고 이 셀은 실제 사용전압보다 낮은 전압에서 부분방전의 발생이 가능하고 셀 내부의 가스압력 등과 같은 환경조건은 실제 사용조건과 거의 같게 유지시키도록 하였다. GIS의 경우, 자유이물을 갖는 결합셀로 하며 가스압은 실제 정격압력의 $\pm 15\%$ 이내로 하고 부분방전량을 5pC의 크기를 발생할 수 있는 구형의 금속 이물로 하였다. 구 이물의 경우 인가전압의 위상에 관계없이 일정한 부분방전을 발생시키며, 구이물의 크기 변화로 방전량의 조정이 가능한 것으로 알려져 있다.

감도 시험용 챔버는 사용하고자 전력기기의 일부이거나 이를 모델화한 것으로 부분방전량 평가시, 펄스에 반사파가 증첩되지 않도록 크기가 충분하거나 흡수체가 설치된 것으로 정하였다. 또한, GIS의 경우 공칭전압 별로 국내 제조사의 여건을 고려하여, 내 외부 도체 크기를 다음 표 1과 같이 추천하였다.

전자파형의 부분방전 측정장치에서 부분방전량에 대한 절대적인 값을 가질 수 없으므로 장치에서 방전량에 대한 민감도는 정량측정법인 IEC60270 에 따른 측정법과 비교하여 비교평가를 해야 한다. 차폐가 된 곳이나 잡음이 측정치의 50% 이하인 영역에서 측정을 실시하며 비교하여 상대적으로 측정을 실시하며, 센서의 상한 주파수보다 1.2 배의 높은 주파수의 대역폭과 상한 주파수의 5배 이상의 샘플링율을 갖는 디지털 오실로스코프를 사용하여 결합셀에서 발생된 부분방전의 신호를 센서를 통하여 펄스 파형을 측정하고 전력을 계산한다.

다. 측정평가를 위한 시험장비

여기서는 본 규격의 '5.5항' 과 '5.7항' 에 대해서 설명하였다

1) TEM/GTEM 셀

센서의 유효높이를 측정하는데 필요한 기기들의 기준은 안테나를 제외한 9 kHz ~ 40 GHz에서 동작하는 전자계 센서와 프로브들의 교정 기준인 IEEE 1309-1996를 적용하였다. GTEM셀은 측정되는 주파수 전대역에서 고차모드가 발생되지 않아야 하며, 일반적으로 추천되는 TEM셀의 주파수대역은 150kHz에서 가장 낮은 고차모드의 첫 번째 공진 주파수까지이다(보통 > 2GHz). 주파수대역은 하나의 셀에서 측정되어야 하고, 측정되는 전 주파수대역에서 정재파비(VSWR)는 1.5이하이어야 한다.

2) 교정용 펄스신호 발생기

GIS에서 센서 감도 유효범위 측정용으로 사용되는 교정용 펄스신호 발생기는 상승시간이 1ns이하의 것이어야 하고 출력전압, 상승시간, 펄스폭 및 하강시간 등의 조정을 통하여 UHF 영역의 부분방전 신호 스펙트럼과 20% 이내로 같은 모양의 스펙트럼을 출력할 수 있어야 한다.

라. 부분방전 측정장치의 특성평가

표 1 감도시험용 챔버의 추천크기

공칭전압	내부도체 외경	외부탱크 내경	비고
72 kV	80 mm 이상	차단 주파수가 450-600 MHz 범위의 내경	주) 참조
170 kV	80 mm 이상	차단 주파수가 350-500 MHz 범위의 내경	주) 참조
362 kV	120 mm 이상	차단 주파수가 260-400 MHz 범위의 내경	주) 참조
800 kV	200 mm 이상	차단 주파수가 140-200 MHz 범위의 내경	주) 참조

주) 동축 원통구조에서 TE₁₁ mode의 차단 주파수 : $f_c(\text{MHz}) = 9.55 \times 10^4 / (a+b)$, a : 내부도체 외반경, b : 외부탱크 내부반경 단위는 mm

여기서는 본 규격의 '6.2항' 과 '6.3항' 에 대해서 설명하였다

1) 센서의 주파수 대역특성 평가

주파수대역 특성평가 방법은 기본적으로 통용되는 방법을 기준으로, 기술위원회를 통하여 결정하였다. 센서의 주파수대역은 일정 반사계수 값 이하로 하고, 일정 유효높이 이상으로 정의하며 측정된 값으로부터 두 가지의 값을 모두 만족하는 대역으로 하였다.

2) 앰프의 주파수 대역 및 증폭율의 평가

앰프에 관한 평가방법 역시 기본적으로 통용되는 방법을 기준으로 기술위원회를 통하여 결정하였다. 광대역 스위칭방식의 회로망 분석기에 의하여 주파수에 대한 증폭율을 구하고, 6dB 이하로 떨어지는 영역까지의 주파수를 대역폭으로 한다. 결합된 표시장치가 분리가 불가능한 경우는 제작자와 사용자가 협의하여 정하며 기술적인 근거를 제시해야 한다. 이의 측정에서는 주파수에 따른 입력의 크기와 출력의 크기가 측정되어야 한다.

마. 부분방전 측정장치의 시험

본 규격 '7항' 은 형식시험과 검수시험으로 이루어져 있으며, 형식시험에서 센서의 경우, 전항의 시험방법 및 절차에 따라 반사계수, 유효높이, 부분방전량의 감도를 측정한다. 앰프특성은 전항의 시험방법 및 절차에 따라 주파수에 따른 증폭율과 입력전력의 범위(Dynamic range)를 측정한다. 센서와 앰프를 포함한 부분방전 측정치의 특성시험은 표 1의 챔버를 사용하여 실시하며, 표준 결합셀에 의한 측정이 가능한 최소 부분방전량과 모델방전 또는 교정펄스에 의한 최대 방전량의 측정을 실시한다. 검수시험에서 센서특성시험은 형식시험에 통과한 같은 형태의 센서에 대해서는 반사계수를 전량 측정하고 이를 만족하는 센서만을 사용한다. 부분방전

측정장치의 검수시험은 표준 결합셀 또는 펄스파를 사용하여 최소 부분방전량만 측정하고 평가한다. 센서의 유효영역시험은 시험을 만족한 센서를 사용하며 표준 결합셀 시료로부터 발생하는 부분방전 또는 그와 같은 전력 주파수 스펙트럼을 갖는 펄스파를 사용하여 전력 기기에 설치된 센서가 전력기 내에서 특정 방전량 이상의 부분방전을 검출할 수 있는 영역을 평가하며, 정해진 방전량의 크기에서 전력기기의 조건을 명시한 유효영역범위를 표시한다.

바. 부분방전 데이터의 기록과 저장

본 규격 '9항'에 규정된 부분방전 측정장치로부터 측정되어 저장되는 데이터의 형식은 "CIGRE data format for GIS partial discharge software applications"을 적용하여 규정하였다. 데이터의 형식을 규정하는 목적은 부분방전의 측정결과의 데이터를 타 시스템 간에 교환이 원활하고, 장기간의 부분방전 데이터의 연속성을 확보하여, 부분방전 데이터수집과 부분방전 분석을 분리하기 위해 필요하다. 부분방전 데이터 형태는 어떤 스프레드시트 소프트웨어에서도 읽을 수 있는 ASCII-code구조로 출력 가능하도록 정하였다. 그 형태는 네 개의 텍스트부분과 하나의 데이터 부분으로 구성된다. 그 중 측정 일시/장소 등의 일반적 묘사 항목, 대상전력기기/결합종류 등의 시료에 관한 정보 항목, 측정과정/설비 등의 측정장치에 관한 정보 항목은 선택사항이며, 데이터 기록에 대한 설명, 데이터에 포함된 그래프 수, 데이터의 차수(dimension), 데이터 크기(size), 축 라벨링 등의 데이터헤더항목과 측정된 데이터를 포함한 데이터기록 항목은 의무사항으로 정하였다.

사. 전자파센서의 평가방법 의 예

여기서는 앞의 본 규격 '4.3항'에서 규정된 센서의 이득측정에 관해서 평가하는 방법을 예시한 본 규격의 해설서의 '8항'에 대한 상세설명이다.

부분방전 측정에 사용되는 전자파 센서의 이득은 센서의 방사특성과 설치되는 구조물과의 관계에 의존한다. 따라서 센서가 설치되는 모든 전력구조물 개개에 대한 특성을 고려할 수 없으므로 표준화된 조건에서 평가하며, 센서의 유효높이(He)를 특성 파라미터로 사용한다. 이 유효높이 값은 안테나의 감도를 간접적으로 나타낼 수 있는 함수이다. 그러나 부분방전센서는 자유공간에 설치되지 않기 때문에 이 값을 직접적으로 측정할 수 없으며, 주변 전계와 출력전압을 측정하여 계산하는 것은 가능하다. 다음 식(1)과 같이 센서의 유효높이는 센서에 표준 전자기장(Er)을 가했을 때, 그 전자기장과 센서의 출력(Vo)사이의 전달함수이다.

$$V_o(\omega) = H_e(\omega) E_r(\omega) \quad (1)$$

여기서 $V_o(\omega)$:센서의 출력, $H_e(\omega)$:센서의 유효 높이, $E_r(\omega)$:표준 전자기장이다.

센서의 전달함수는 주파수 영역에서 입력전계 $E_r=1 Vm^{-1}$ 는 센서 표면에 수직인 전계에 대한 출력전압을 측정하여 구한다. 단위는 $V/(Vm^{-1})$ 나 m이다.

표준전자기장 발생장치로 GTEM셀을 사용하고, 전달 표준법을 이용하여 센서의 유효높이를 측정할 예를 아래에 기술하였다.

그림 1과 같이 유효높이를 알고 있는 1차 교정된 표준 프로브를 GTEM셀 내부에 설치한 후 표준전계를 가하

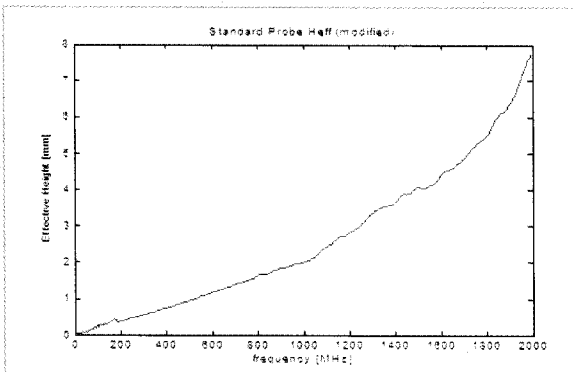


그림 1 표준프로브의 유효높이

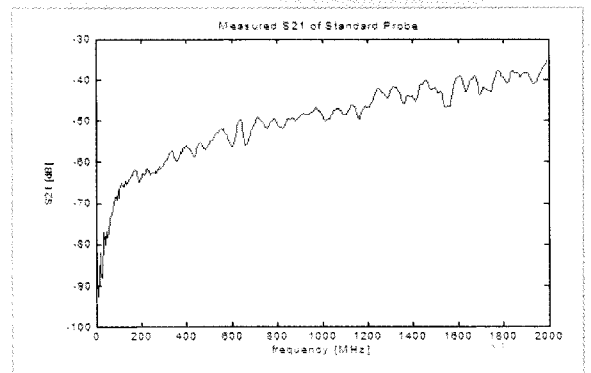


그림 2 표준프로브로 측정된 전자계세기

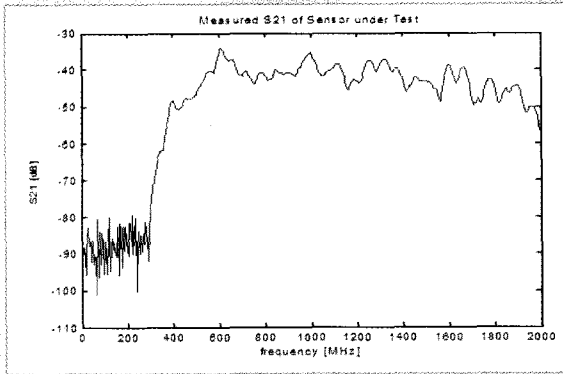


그림 3 교정용 전자계 센서의 측정결과

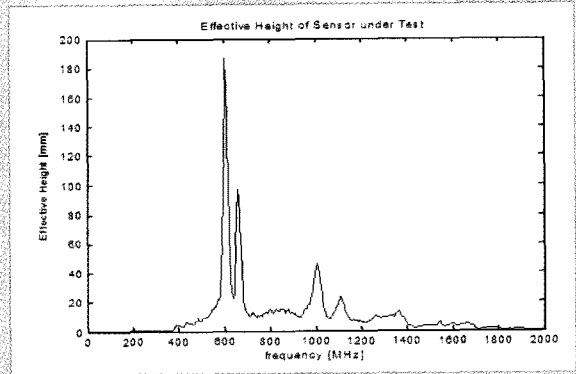


그림 4 전자계 센서에서 계산된 유효높이

여 그 출력을 그림 2와 같이 측정한다. 그 후 프로브가 설치되었던 동일한 위치에 교정될 센서를 설치한 후 표준전계를 가하여 그 출력을 그림 3과 같이 측정하면, 전달 표준법에 근거하여 그림 4와 같이 센서의 유효높이를 계산할 수 있다.

3. IEC 규격 동향

IEC의 부분방전에 대한 규격은 IEC TC 42 WG 위원회에서 제정 및 개정을 하고 있으며, 초기의 IEC 270은 커플링 부분방전 측정법에 대해서 용어의 정의 시험방법, 시험회로 및 교정방법 등에 대한 것을 기술하였고, 그 후 IEC60270으로 개정되면서 디지털 측정기술에 따른 요소들을 규정하는 것이 추가되었다. 이 규격에서는 측정의 표준이 되고 있는 커플링 커패시터법이 세밀하게 기술되어 있으나, 전자파법에 의한 측정법에 대해서는 기술이 되어 있지 않다. 이 위원회에서는 High Voltage Test Techniques: Measurement of Partial Discharges by Electromagnetic and Acoustic Methods? IEC62478 규격을 제정 중에 있으며, 전자파와 음향방출 방법에 대한 것이다. 이 규격 위원회에서는 오스트리아 그라츠 공대 Michael Muhr 교수를 중심으로 규격의 목차가 정해진 상태이고 내용을 편집·수정하고 있는 것으로 조사되었다.

4. 결 언

본 고에서는 국내의 부분방전 측정기술의 발전을 위하여 전자파 부분방전 측정장치의 규격인 KSC3700을

제정하게 된 동기와 제정된 규격에 대한 해설을 하여 부분방전의 측정 및 진단장치의 개발과 적용에 적극 활용하게 될 것으로 기대하고 있으며, IEC 규격의 동향에 관해서 IEC60270규격의 특성과 IEC62478의 제정에 관한 정보를 제공하였다. 그러므로 부분방전 측정 및 진단기술의 발전에 도움이 될 것이라고 사료된다.

참고문헌

1. IEC60270: "High Voltage Test Techniques - Partial Discharge Measurements," 2000, 12.
2. CIGRE TF 15/33.03.05 of WG15.03: "Partial Discharge Detection System for GIS: Sensitivity Verification for the UHF Method and the Acoustic Method," Electra No.183 April 1999.
3. S.M. Berlijn and W.R. Rutgers, "Evaluation of different partial discharge detection methods for usage in on-line monitoring and on-line inspection system for GIS," CIGRE 33-94(WG03)IWD.
4. IEEE 1309-1996: "IEEE Standard for Calibration of Electromagnetic Field Sensors and Probes, Excluding Antennas, from 9 kHz to 40 GHz."
5. IEC61967-1: "Integrated circuits Measurement of electromagnetic emissions, 150kHz to 1GHz Part1: General Conditions and definitions."
6. IEC61967-2: "Part2: Measurement of radiated emissions TEM cell and wideband TEM cell method."