



전기설비의 절연열화 진단 기법

박희보*, 임기조**, 구자윤***, 김성재†

(*숭실대 공대 전기공학과 교수, **충북대 공대 전기공학과 교수, ***한양대 전기공학과 부교수, †충청남도대 산업안전과 조교수)

1. 서 론

경제 발전과 사회전반의 생활수준 향상에 따른 전기 에너지의 원활한 공급을 위해서는 전력설비의 증설 및 보수는 불가피하며, 또한 이러한 설비들은 점점 대용량화, 초고압화 되고 있다. 뿐만 아니라 최근의 산업설비는 대량생산체제로 인하여 자동화 및 고도화되며, 정보 중심사회로의 발전으로 컴퓨터 등 정보기기의 확대에 따라 신뢰성 높은 전기설비의 상시감시 및 예방진단 기술 개발이 요구되고 있다.

전기설비에 전압이 인가된 상태로 오랜 시간이 경과하면 절연이 취약한 부분부터 열화가 진행되거나 결함이 발생하고 이에 따라 국부적인 절연파괴가 진행되고 결국 전로파괴에 이르게 된다.

변압기의 내부이상을 진단하는 방법으로는 부분방전법, 절연유의 특성시험 및 가스분석법, 역률측정법, 전압서어지 시험법 등이 있으나, 진단방법의 특성 및 신뢰성을 고려할 때, 어느 한 방법으로는 불충분하므로 각종 진단 결과의 종합분석이 필요하다.

케이블 시스템의 사고는 예방 진단에 근거한 정확한 진단으로 피할 수 있으며, 잔여수명 예측 기술은 진단 방법의 체계적인 적용에 의해 향상될 수 있다. 따라서 본 고에서는 케이블 시스템 진단 방법의 체계적인 개발을 위해서 60 kV급 이상의 종이 절연 혹은 고분자 절연 전력 케이블과 그 접속 자재에 대해서만 진단 방법을 개략적으로 소개만 하고 있으며 수트리에 관련된 열화, 절연체의 열화를 제외한 모든 열화현상과 DC 케이블에 대해서는 언급을 하지 않았다.

회전기 고체절연체의 열화에 의해 야기되는 변화는 회전기 진동을 발생 시키고, 진동은 기계에 심각한 손상을 발생 시킨다.

회전기의 절연열화 진단은 유전손실, 유전율, 음향 등의 측정/분석으로 가능하고 적용 방법은 on-line/off-line으로 가능하다. 절연 시스템의 열화정도 판정은 회전기의 적절한 보수시기의 판단을 가능하게 하여 유지 보수비의 절감 및 회전기의 수명연장을 가능하게 할 것이다.

2. 변압기의 진단기술

변압기의 유지보수는 일상순시와 전력설비를 일정기간 사용함에 따른 정기점검에 의하여 불량개소를 발견하며 보수하는 일정주기에 따른 예방보수를 하였으나, 변압기의 원활한 운용과 신뢰성의 확보가 더욱 중요시되기 때문에 변압기의 상태를 점검하여 정비하는 상태점검으로 전환하고 있다.

따라서 최근에는 변압기의 이상징후를 운전상태(on-line)에서 상시 감시하여 장애에 일어날 사태 등을 예측하고 그것이 치명적이기 이전에 처리하는 예측보전기술 중심으로 변하고 있다.

변압기의 내부이상을 진단하는 방법으로는 부분방전법, 절연유의 특성시험 및 가스분석법, 역률측정법, 전압서어지 시험법 등이 있으나, 진단방법의 특성 및 신뢰성을 고려할 때, 어느 한 방법으로는 불충분하므로 각종 진단 결과의 종합분석이 필요하다.

2.1 변압기의 열화요인

절연재료에 있어서는 열적열화, 외부단락에 의한 열적·기계적 손상, 부분방전 등의 열화요인으로 인하여 기계적 강도저하, 진동증가, 가연성 가스발생 등이 일어나 절연 파괴로 진전된다.

여기서 열화진단 지표로서는 유중용해 가스의 변화, 절연유의 특성변화, 절연지, 프레스보드의 중합도저하 등이 있다. 점검법으로는 유중가스분석, 절연유의 파괴전압측정, 중합도측정 및 진동, 소음측정 등이 있다.

한편, 외부재료로서는 가스켓이 주된 열화재료이며, 이것은 경년열화에 의하여 탄력성저하, 변형, 균열을 가져오거나 누유로 진전한다. 열화진단 지표로서는 누유의 유무, 균열의 유무가 있고, 점검법으로는 육안점검에 의한다.

또, 유압변압기에 사용되는 부하시의 탭절환기와 무전압 탭절환기에 있어서는 점점재료로서 동, 동합금 및 은, 은합금이 사용되고 마모, 유화동 생성에 의하여 열화하며 접촉 저항의 증가 또는 불안정, 탭 단락이나 절연파괴로 진전한다.

열화진단 지표로서는 동작회수, 조작토크, 전환개폐기의 내호금속두께 및 접촉상태, 접촉자의 동작상황이 있고, 점검법으로는 동작회수의 기록, 보통점검, 정밀점검에 의하여 행한다.

2.2 변압기 진단기법

2.2.1 유증가스분석에 의한 진단

변압기의 내부에 국부적인 과열이나 부분방전이 발생하면 절연유나 절연물이 분해하여 가스가 발생한다.

이 분해가스는 절연유에 용해되기 때문에 유증용해 가스 분석을 가스크로마토그래프에 의하여 분석하고 가스성분, 발생량, 경시변화를 분석함으로써 변압기의 이상상태의 종류나 진전상태를 판단할 수 있다.

일반적으로 분석대상가스는 O_2 , N_2 , H_2^* , CH_4^* , $C_2H_6^*$, $C_2H_4^*$, $C_2H_2^*$, CO^* , CO_2 등 9종류의 가스이다.(여기서 *는 가연성 가스이다.) 변압기 내부의 이상의 종류에 따라 표 1 과 같이 발생가스성분이 나타나므로, 발생가스의 양 및 가스조성비에 의해 변압기의 내부이상 유무, 그 정도 및 이상의 종류를 추정한다.

표 1. 이상의 종류에 의한 가스성분

이상의 종류	유증 용해가스 (: 주요발생가스)
절연유의 과열	H_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_6 , C_3H_8
유침 고체 절연물의 과열	CO , CO_2 , H_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_6 , C_3H_8
절연유 중의 방전	H_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_3H_6
유침 고체 절연물의 방전	CO , CO_2 , H_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_3H_6

가스분석결과와 판정방법에는 다음과 같은 것이 있다.

- ① 각 성분가스에 의한 판정
- ② 가연성 가스총량 및 각 가스량에 의한 판정
- ③ 가연성 가스총량의 증가경향에 의한 판정

2.2.2 절연지의 진단

절연지의 열화 지표로서 기계적 성질과 상관관계가 있는 평균중합도가 높아진다. 그러나, 평균중합도의 측정은 운전 중인 유입변압기에서는 실시할 수 없고 오버홀 등의 기기 정지시에 한한다. 따라서 실제의 진단에 있어서는 평균중합도와 상관관계가 있는 $CO + CO_2$ 생성량을 측정하여 판단하는 방법이 검토되고 있다. 한편, 운전시의 부분방전 레벨이나 진동·소음의 이상증가를 검출하는데 따라서 기기의 위험도를 추정하는 것도 가능하다.

2.2.3 절연유 특성시험

절연유는 열화하면 절연파괴전압, 전산가, 체적저항, 유전 정접($\tan \delta$), 점도, 인화점 등이 변한다. 따라서 변압기의 절연유를 채취하여 이와 같은 특성치를 측정하고, 표 2의 기준치와 비교, 분석하면 절연유의 열화를 측정할 수 있다.

표 2. 절연유의 보수관리기준치

구분	기준치	판정	
절연파괴전압 (kV)	신 유	30kV	
	사용중인 절연유	> 20kV 15kV ~ 20kV < 15kV	양 호 요 주의 불 량
체 적 저 항 율 (80℃, $\Omega \cdot cm$)	신 유	< 1×10^{12}	양 호
	사용중인 절연유	$1 \times 10^{11} \sim 1 \times 10^{12}$	요 주의
	사용중인 절연유	< 1×10^{11}	불 량
전산가 (mg-KOH/g)	신 유	< 0.02	
	사용중인 절연유	< 0.2 0.2 ~ 0.4 > 0.4	양 호 요 주의 불 량
	유전정접 (50℃, %)	1.25 1.25~1.5 1.5	양 호 요 주의 불 량
수 분	절연저항		
	신 유	< 40ppm	양 호
	사용중인 절연유	40ppm~50ppm > 50ppm	요 주의 불 량

2.3 변압기 예방진단 자동감시기법

최근 변압기의 사고를 미연에 방지하기 위하여 활선상태에서 사고가 발생하기 전에 이상유무를 진단하는 장치가 개발되어 실용화되고 있다. 내부사고에 도달하기 전에 부분방전이나 유증분해가스가 생성되므로 가스분석이나 부분방전을 감시하면 효과적으로 사고를 방지할 수 있다. 예방진단 장치는 각종 센서를 변압기에 부착하고 센서에서 검출한 정보를 컴퓨터로 데이터 처리하여 변압기의 이상을 검출한다.

2.3.1 유증가스 분석

2.3.1.1 다종류 가스 자동분석장치

내부이상시에 발생하는 가스를 다성분 가스분석장치로 분석하면 자세한 정보를 얻을 수 있으나, 경제성의 관점에서 가스 크로마토그래피 대신에 H_2 , CO , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 등 6종류, H_2 , CO , CO_2 , HC 등 4종류 및 가연성 가스의 총량(TGC)만을 상시감시하고, 이상검출시에 다성분 가스분석장치를 이용하여 정밀진단하는 방법이다. 이 기법은 가스의 절대량, 구성가스의 패턴, 경년변화 추이 등의 정보를 축적하고 전문가의 지식으로 판단하도록 전문 시스템화되어 있다.

2.3.1.2 수소 가스 검출장치

유증 용해가스 중에서 주성분인 수소가스만을 집중 분석하는 기법이다. 특정가스중 수소가스가 가장 널리 적용되고 있는 것은 변압기의 내부 이상시 수소가스는 다른 가스와 동반하여 필히 발생하며, 내부이상이 진전됨에 따라 발생하는 수소가스량이 비례적으로 증가 경향을 보이기 때문이다. 이와 같이 수소가스는 내부이상 및 다른 가스와의 상관관계가 클 뿐만 아니라 투과막을 사용했을 때 평형상태가 되는 시간이 다른 가스에 비해서 훨씬 짧으므로 추출이 쉽다.

2.3.2 부분방전 측정

변압기의 중대사고 요인인 내부절연 이상은 돌발적인 사고를 제외하고는 대부분 부분방전을 수반하므로, 부분방전과 절연수명은 깊은 상관관계가 있다고 인정되어 왔다. 또한 부분방전은 이상상태 발생시 다른 징후보다 응답이 빠른 특성을 지니고 있으므로 부분방전을 지속적으로 관찰하면 변압기 사고를 미연에 방지하거나 감소시킬 수 있는 유효한 방식이다.

변압기 내부에서 부분방전이 발생하면 전기적인 펄스전류와 그것에 동반된 음파(가정주파수에서 초음파)가 발생한다. 따라서 변압기 내에서 발생하는 부분방전을 검출할 수 있는 방법으로는 로고우스키 코일(Rogowski coil)을 이용하여 부분방전에 의한 전류펄스를 검출하거나, 변압기 외함에 초음파 탐지기를 설치하여 절연유중으로 전달되는 초음파를 검출하는 방식이 있다.

3. 고전압 절연 케이블 시스템의 진단 방법

케이블 시스템의 사고는 예방 진단에 근거한 정확한 진단으로 피할 수 있으며, 잔여수명 예측 기술은 진단 방법의 체계적인 적용에 의해 향상될 수 있다.

따라서 이 보고서는 케이블 시스템 진단 방법의 체계적인 개발을 위해서 60 kV급 이상의 종이 절연 혹은 고분자 절연 전력 케이블과 그 접속자재에 대해서만 진단 방법을 개략적으로 소개만 하고 있으며 수트리에 관련된 열화, 절연체의 열화를 제외한 모든 열화현상과 DC 케이블에 대해서는 언급을 하지 않았다.

본 보고서는 첫째 운전중의 케이블 혹은 주변장치에 사고를 일으키는 열화현상 발생 지점을 파악하거나 그 정도를 알아낼 수 있는 기법이나 절차를 연구하는데 도움을 주고, 둘째 잔여수명을 예측할 수 있고 미래의 케이블 시스템 운영에 관련된 방안을 제시할 수 있도록 하기 위해서 종이 절연 케이블과 고분자 절연 케이블의 진단방법을 test 성격에 따라 다음과 같이 분류 소개한다.

- ① Field or ON-SITE Test
- ② Laboratory Test

3.1 종이 절연 케이블

3.1.1 On-site test

- 1) Tests on the non-metallic sheath
 - 어떤 형태의 열화이던 간에 결과적으로 metallic sheath의 노출로 나타남.
 - nonmetallic sheath는 DC voltage test로 시험한다.

2) Pressure monitoring

Pressure transducer와 fiber optic data transmission 시스템을 이용하여 누유를 감지함으로써 metallic sheath의 피로, 부식, 기계적인 손상 유무를 알 수 있다

3) Oil analysis

오일의 상태, 비정상적인 운전여건 즉 overheating, PD 발생 등에 대한 정보

목적 : - 고장이 일어나기 전에 premature failure에 대한 조기정보

- 잔여 수명예측

a) Dissolved gas analysis

Cable의 defect type 및 비정상 운전여건에 대한 data제공 예를 들면 PD 발생 혹은 overheating 장소

b) Accessing paper ageing by oil analysis

케이블 시스템은 산소의 농도가 낮기 때문에 chemically less reactive environment이다. 따라서 raldehyde를 절연지 열화의 기준으로 택하는 것은 적합 하지 못하여 연구가 진행중

4) Cable Temperature Monitoring

요즈음 설치되는 신 지중선로에는 케이블의 operating temperature를 전력 케이블에 optical fiber temperature sensor를 내장하여 monitoring하고 있다.

반면에 기존선로에는, 케이블의 온도를 직접 측정하는 것이 가능하지 않지만 real time thermal modeling 기법을 이용한 도체온도를 간접적으로 산출하는 방법을 주로 이용하고 있다.

a) Indirect Temperature Monitoring

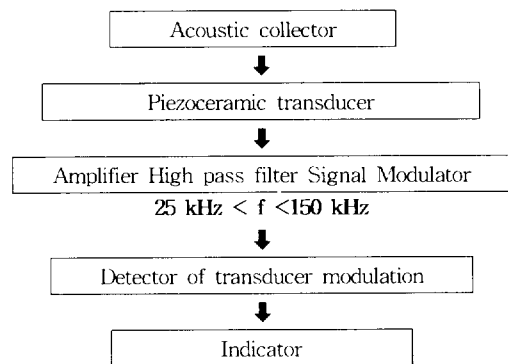
b) Direct Temperature Monitoring

5) Partial Discharge Detection

a) 전기적인 방법

OF Cable은 metallic sheath로 밀폐되고, 접속부는 metallic sleeve로 구성되어 있어서 PD 측정은 단지 Sealing end에서나 cable sheath와 joint에 interruption을 만들면 가능하다.

b) 초음파 방법



6) Metallographic examination of the sheath

7) X-ray inspection of cables and accessories

3.1.2 Laboratory Test on Samples

- 1) Oil analysis
 - generally off-line application
- 2) Examination of paper
 - a) Visual during dismantling of the insulation
 - b) Chemical characterization
 - Stained paper를 여러 화학적인 절차를 거쳐서 처리하면 전기 방전에 의한 부산물 존재 여부의 파악이 가능
 - Paper fiber의 viscosity를 측정하면 절연지의 degree of polymerisation을 알 수 있다.
→ 열화진행중인 molecular chain scission 여부를 알 수 있다.
 - 유전체의 물의 함유량
→ 외부로부터의 오염 및 공정상의 문제점을 파악
 - c) Mechanical characterization
 - tensile, folding : reliable results
 - burst, tear strength : scattered results
- 3) Inspection of sheath and reinforcement
 - a) Lead sheath
 - b) Aluminum sheath
 - c) Corrosion product
 - Cause of corrosion ⇔ composition of corrosion production
(Rq) NACE standard RP-01-73
 - d) Cracks in the sheath
 - 부하 변동에 의한 함침된 복합물의 열팽창 수축은 sheath crack과 깊은 관계가 있어서 두가지 방법이 사용된다 :
 - Chemical analysis : ASTM E-371, E-34
 - Hardness and tension testing : ASTM E-92, E-8
- 4) Electrical tests
 - Tan δ : IEC 141-1
 - Impulse test : BIL에서 시작해서 파괴될때까지

3.2 고분자 절연 케이블

3.2.1 ON-site tests

- 1) Test on the non-metallic sheath
 - 어떠한 열화 mechanism에 의해서든지 최종 나타나는 현상은 금속 sheath나 screen 그리고 절연층이 외부에 노출이 된다.
- 2) Cable Temperature Monitoring System
 - OF cable에 적용되는 distributed temperature sensing이 그대로 적용되거나 self contained OF cable

의 접속은 고분자 절연케이블의 접속보다 매우 복잡하기 때문에 전자의 경우 optical fiber를 OF cable 외 피에 부착시키나 후자의 경우는 screen이나 sheath에 삽입시키는 것이 4-5년전부터 선호되고 있다.

3) Partial Discharge Detection

a) Cable에서의 PD 측정

5년전에 Pick-up coil을 이용한 HFDP detection method를 66-154kV급 copper wire shield cable에 적용 시도하였으며, 77kV급 2km 선로를 이용한 결과 10-20MHz band에서 PD source와 detector 사이의 거리에 따라 달라지지만 대체적으로 40-60pC 정도의 sensitivity를 얻은 결과가 보고되었다.

b) Accessory 에서의 PD 측정

- ① Sheath interrupter
- ② Detector coil
- ③ High-pass filter sensor
- ④ Switching impulse voltage

4) 금속sheath의 금속학적 검사

OF cable의 경우와 동일

5) Cable과 접속재의 X-ray검사

금속sheath가 없는 상태에서 낮은 에너지의 X-ray를 이용하여 케이블과 접속재에 존재하는 비교적 큰 insulation defect를 분석하는데 주로 적용되고 있다.

Be를 이용한 50~60KeV 정도의 X ray를 이용하면 5~10mm 정도의 두께를 갖는 폴리에틸렌 절연층을 자세히 분석할 수 있다.

3.2.2 Laboratory test

1) 절연층에 대한 물리화학적 분석

a) Polymer morphology

- DSC : insulation density, %crystallinity, melting temperature, degree of cross linking, thermal history about the operating temperature
- Optical microscopy : cavities (10~1000 μ m)
- Electron microscopy : spherulite
- OIT with DSC : presence of antioxidant (polymer에 잔여 antioxidant가 없는 경우는 cable의 열화과정에서 oxidation이 발생된 것을 의미)

b) Impurities

- Karl-Fischer method : water content of the polymer
- IR spectroscopy : organic impurities

(ex : cross linking by-product or oxidized compound)

- c) Electrical characterization of the insulation and semiconducting screens
 - Electrical characterization
 - Tan δ
 - Dielectric strength
 - Spare charge
 - Resistivity of semiconducting screens: (IEC 840 Appendix B)
 - d) Mechanical characterization of the synthetic insulation
 - Mechanical characteristics
 - Tensile modulus
 - Ultimate elongation
- (Rq) 신 케이블에서 측정하고난후 240시간 특정 온도에서 열화시킨후 다시 측정
(LDPE at 100°C, HDPE at 110°C, XLPE at 135°C)
-Heat elongation : (200°C에서 15분간 0.2MPa인가)

- 2) Electrical tests on cable and accessories
 - PD measurement (IEC 840)
 - AC withstand test(4Hours, <2Uo)
 - Impulse (IEC 840)

Starting on a reduced level of BIL and with increasing steps until BD.

3) Inspection of lead or aluminum sheath and reinforcement.

- ① Lead sheath
- ② Aluminum sheath

4. 회전기의 진단기술

권선절연은 발전기나 모터와 같은 회전기의 가장 중요한 부분중의 하나이다. 도체는 복수의 구리선으로 구성되고 주절연은 일반적으로 마이카/수지층으로 구성된다. 마이카는 耐부분방전성이 우수한 물질이기 때문에 주 절연물로 사용해 왔다. 슬롯내의 두 개의 절연 도체는 대전류에 의한 기계적인 진동을 억제하기 위해 췌기로 고정되어 있다. 고체절연체의 열화에 의해 야기되는 변화는 회전기 진동을 발생 시키고, 진동은 기계에 심각한 손상을 발생 시킨다.

회전기의 절연열화 진단은 유전손실, 유전율, 음향 등의 측정/분석으로 가능하고 적용 방법은 on-line/off-line로 가능하다. 절연 시스템의 열화정도 판정은 회전기의 적절한 보수시기의 판단을 가능하게 하여 유지 보수비의 절감 및 회전기의 수명연장을 가능하게 할 것이다.

4.1 회전기의 절연열화

운전중의 회전기 고정자 권선의 절연은 전기적, 기계적, 화학적인 각종 스트레스를 받고, 이들 스트레스에 의해 절연이 점차 열화하여 결국 절연파괴에 이른다. 표3은 스트레스의 종류와 열화현상의 관계를 보인 것이다.

전기적 열화의 주요인은 부분방전 열화, 트리열화, 트래킹 열화이다. 부분방전 열화는 절연층 내에 생긴 미소한 보이드나 절연물 표면의 공극등에서의 부분방전에 의해 절연이 서서히 침식되어 열화하는 것이다.

트리 열화는 권선도체의 각 부나 미소한 공극등의 전계가 높게되는 부분에서 발생하는 방전열화이다. 또, 트래킹 열화는 절연물 표면의 미소한 방전에 기인한 절연물의 탄화열화 현상으로 화학적 열화와도 관계된다. 이들은 국부적인 절연파괴 현상이고 절연물의 약점 부분에서 점차 진전하고 전로파괴에 이르게 된다.

4.2 회전기의 열화진단 기법

4.2.1 Off-line 진단 기술

전형적인 off-line진단은 절연저항, dc누설전류, 분극율 (PI), tan δ , $\Delta \tan \delta$, 최대부분방전 전하량 Q_{max} 등과 같은 파라미터를 적용한다.

표 3. 회전기 절연의 스트레스와 열화 현상

스트레스	열화인자	열화현상	
전기적	부분방전, 아아크 트리잉, 트래킹	산화, 열분해 탄화, 파괴	
기계적	진동, 열 사이클 열팽창, 충격, 크립	크랙, 파단 분해, 마모	
화학적	열열화	열, Heat cycle	열분해, 산화분해
	환경열화	흡습, 흡수, 화학약품 기름, 먼지, 용제, 오존	팽윤 용해

각 파라미터는 열화된 절연체의 각 파라미터 간의 결점을 보완하기 위한 것이며, 예를 들면, $\Delta \tan \delta$ 는 전체의 방전보이드의 체적에 비례하는 것으로 고려되고 방전보이드의 전체체적에 따라 열화정도가 증가한다. tan δ 는 물질자체의 유전특성을 반영한다. 절연저항, dc누설전류와 PI는 흡수되는 습기와 오염의 양을 반영한다. 정격 ac 전압에서 Q_{max} 는 최악의 절연열화 상태를 나타낸다.

또한 각 파라미터를 복합한 새로운 파라미터가 사용된다. 손실율과 정전용량의 변화량은 새로운 파라미터 Δ 로서 제안되었다. 최대 부분방전이 국부적결함과 관계되고, Δ 는 전체열화량과 밀접한 관계가 있다. 따라서, 절연상태는 Δ 와 Q_{max} 의 관측으로 평가하는 것이 가능하다.

절연저항과 권선정전용량의 곱 RC는 폴리에스터가 사용된 회전기 절연체에 대한 진단기준으로 제안되었다. DC 절연저항은 회전기 주위의 습도에 의해 영향을 받는다. 마이카/폴리에스터 복합 절연체의 경우 건조 및 습한상태인 경우 저항치의 대수치 비($\log(R_d)/\log(R_w)$)는 진단기준으로 적

용이 가능한 것으로 알려져 있다.

4.2.1.1 유전손실의 측정

유전손실 값은 시스템에 사용된 특별한 재료(특히 bonding resin)에 의존하며, 코일이나 바내에 있는 보이드 위치, 시스템 내에 구성된 보이드의 양과 크기의 함수이다.

또한 유전손실-온도의 관계는 사용된 수지의 경화 정도와 밀접한 관계가 있다.

유전손실의 측정은 IEEE 286(A recommended practice for measurement of power factor tip-up of rotating machinery stator coil insulation)을 적용한다.

4.2.1.2 유전율의 측정

회전기 절연 시스템의 유전율은 부분방전의 발생 양상과 밀접한 관계가 있다. 교류전압의 인가시 절연시스템을 구성하는 각 요소는 유전율에 의존하여 전압 스트레스를 받는다. 일반적으로 절연 시스템을 구성하는 각 요소의 유전율의 역수에 비례하여 각 유전체에 분압된다.

전압 스트레스는 절연 시스템내에 존재하는 보이드에 집중되기 쉽기 때문에 저유전율을 가지는 절연체를 사용하는 것이 시스템내에 있는 보이드에서의 스트레스를 줄일 수 있다.

4.2.1.3 내압 시험

내압 시험은 시스템 특성 측정으로써 고정자-코일에 행해진다. 이것은 일종의 가속 시험이고, 절연파괴가 일어날 때까지 전압을 상승시켜 시험한다. 내압시험은 IEEE 1043 (Recommended practice for voltage endurance testing of form wound bars and coils)을 적용하여 행한다.

4.2.1.4 고주파 시험

고주파 시험은 일종의 가속 열화 시험이고, 사용 주파수보다 높은 주파수의 정격전압을 인가하여 시험한다. 이 시험은 절연 시스템의 급속한 파괴를 일으키고, 비교 시험에 대해 유용한 것으로 고려되어 연구되고 있다.

4.2.1.5 음향 시험

전력변압기에 사용되는 음향센서기술은 회전기 절연 시스템에도 적용된다. 현재의 에폭시 절연 시스템은 음향임피던스가 낮기 때문에 적용이 더욱 용이하다.

음향 시험은 마이크로폰과 증폭기를 사용하며, 부분방전의 발생이 활발할 때 음을 스피커로 들을 수 있다. 발생음은 PD 발생원을 찾는데 이용된다. 20Hz - 20kHz의 가청 범위에서 PD의 활동을 탐지한다.

4.2.1.6 Radio 시험

부분방전의 발생은 AM라디오 신호의 검출을 방해한다. 시험 방법은 정규방송 주파수 이외의 주파수로 튜닝된 AM 라디오를 사용하는 것이다.

4.2.1.7 Surge 시험

서지 시험은 스위칭 또는 과도 조건하에서 권선간의 절연을 시험하기 위해 도입되었다. 회전기의 가변속 제어용 드라이브 적용 추세에 따라 권선에 서지 시험이 점점 더 중요해지고 있다.

회전기의 절연 시스템에 빠른 상승시간을 갖는 서지가 연속적으로 침입하여 수명을 단축시킨다. 서지 시험은 IEEE 522(Guide for testing turn-to-turn insulation on form-wound stator coils for alternating current rotating electric machines)을 적용하여 행한다.

4.2.1.8 부분 방전 시험

부분방전 현상에 관한 연구는 절연 시스템의 비파괴 진단 기법으로 연구되어 왔으며 절연열화 시험에 적용 가능한 것으로 알려져 있다.

인가된 교류전압 위상각에 따른 부분방전 펄스의 발생 양상은 통계적 기법에 의해 분석되어 왔고, 왜도 S는 부분방전 펄스의 위상 분포형태를 나타내며, 고분자 절연체에서의 전기트리 성장 양상을 관측시 적용 가능하다. 오염되지 않은 에폭시 시편인 경우에 트리진전은 왜도의 변화에 일치한다는 실험 결과가 있었고, 운모함성물에 대한 관계는 확실하지 않다.

4.2.2 On-line 진단 기술

노후된 절연 시스템에서는 전기적, 열적, 기계적 스트레스를 받고 있어 파괴의 위험성이 높다. 따라서 장시간의 정전 없이 회전기의 보수를 행하고, 또한 유지보수를 위한 노동력의 절감과 회전기의 절연상태를 평가하기 위하여 on-line 모니터링 기법이 연구되고 있다.

회전기의 운전중 절연 시스템은 다중스트레스 환경에 노출된다. 회전기 절연시스템에서 특별한 반응이 관측된다면 회전기의 파괴를 미연에 방지하거나, 파괴시 보수 비용 및 시간을 절약할 수 있을 것이다. 현재까지는 주로 off-line 진단법을 사용해 왔으며, on-line 진단에 관한 연구는 최근에 시작되었다. on-line 관측은 주로 전형적인 부분방전 파라미터들과 왜도를 이용하여 신호를 분석한다.

또한 부분방전 신호 분석을 통한 회전기 절연 시스템의 열화 진단시 외부회로에서 침입한 노이즈와 권선에서 발생한 부분방전 펄스를 식별하기 위한 기법이 연구되고 있다. 이 기법은 이미 GIS와 고압 송전선에서 PD감지에 적용되고 있다.

5. 결 론

전기설비의 절연열화 진단은 전기에너지의 안정적 공급 및 유지 보수비의 절감, 설비의 수명 연장적 측면에서 매우 중요하다. 본 보고에서는 변압기, 케이블, 회전기의 절연열화 진단 기법을 검토하였다.

5.1 변압기의 경우

설비유지보수 기술에는 설비의 안전확보 및 이용을 향상, 보수비용의 절감을 목표로 설비고장의 검출 또는 예측기술에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이들 진단장치들은 센서기술의 향상과 데이터 측정기술, 광전송 기술, On-line화 기술, Expert System을 이용한 진단 알고리즘 기술 등의 발달에 따라 급속히 진보된 것으로 거의 같은 이론을 근거로 개발되고 있으며, 일부 요소기술은 현재 적용을 위한 연구가 계속중이거나 신뢰성 확인단계에 있는 것으로 파악되고 있다.

현재 제시되고 있는 monitoring system에 적용되는 대부분의 센서는 높은 신뢰도와 감도로 상용화가 되어 있으나, 전력기기별로 고장원인을 분류, 예방진단시스템에 의해 측정된 비정상상태의 신호와 정상상태의 신호를 비교하고, 비정상상태의 원인과 형태를 분류하는 diagnostic system은 아직까지 확립되어 있지 않았으며, 앞으로의 활발한 연구가 요구된다.

5.2 케이블의 경우

OF 케이블과 고분자 절연 케이블의 진단 기법 개발 관련 전문가들의 현시점에서 종합적인 의견은 다음과 같다.

- ① 고분자 절연 케이블의 경우 열화 mechanism이 명확히 이해되어 있지 않은 이 시점에서 열화 현상에 기초한 진단 방법을 개발하는 것이 매우 어렵다.
- ② 현재 사용되는 방법들은 매우 복잡하고 아직 미흡하다.
- ③ 케이블 시스템의 잔여 수명을 diagnostic test를 통해서 정확하게 예측 될 수는 없다.

따라서 현재 제안 실행되고 있는 방법을 우선적으로 정리하여 경험을 보고하고 새로운 방법의 guideline을 제시하고자 한다. 케이블 시스템의 사고를 분석하여 보면 케이블 본체보다는 부속장치에서 사고 발생률이 비교적 높기 때문에 다양하게 물리 화학적, 전기적, 열적 진단 시험이 제안되었다.

- ※ 향후 케이블 시스템 진단 기술 개발을 위하여 고려되어야 할점
 - 현장에서의 PD 측정 기술
 - 케이블 선로의 온도 분포 특성
 - 케이블 오일 내의 가스분석
 - 물리화학적 분석

5.3 회전기의 경우

회전기 절연 시스템의 절연열화 진단은 파괴의 징후를 사전에 파악하여 사고를 미연에 방지하고, 적절한 유지보수를 가능하게 하여 안전한 운전을 가능하게 할 것이다.

회전기의 절연열화 진단은 유전손실, 유전율, 내압 시험, 고주파 시험, 음향 시험, Radio 시험, Surge 시험 및 부분방전 시험으로 가능하며 이는 off-line으로 진단 가능한 항목이다. 부분방전 펄스의 관측 및 해석은 on-line 진단에 적용 가능하다. 따라서 절연 시스템의 열화 정도 및 결함의 양상과 부분방전 펄스의 상관성을 찾으려는 연구가 활발히

진행되고 있고 또한 on-line진단에 적용시 외부 잡음과 구분하려는 연구도 진행중에 있다.

off-line진단법은 회전기의 열화진단에 성공적으로 적용되어 왔으나 기기를 정지 시켜야 한다. 반면 on-line진단은 기기의 운전중에도 열화진단이 가능하기 때문에 외국의 경우 활발히 연구되고 있고 향후 집중적으로 연구되어야 한다.

참고 문헌

- [1] R.H.Rehder et al, IEEE EI Mag., Vol.12, No.4, pp 8-14, 1996
- [2] R.E.Draper et al, IEEE EI Mag., Vol.11, No.4, pp 7-9, 1995
- [3] W.McDermid, IEEE EI Mag., Vol.9, No.4, pp 7-15, 1993
- [4] Ken Kimura, IEEE EI Mag., Vol.9, No.3, pp 13-20, 1993
- [5] Vicki Warren, IEEE EI Mag., Vol.13, No.2, pp 17-21, 1997

저 자 소 개



곽희로(郭熙魯)

1942년 3월 1일생. 1967년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1978년 호주 New South Wales대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1967년 한전근무. 1986년 미국 MIT Visiting Scientist. 현재 숭실대 공대 전기공학과 교수, 공대학장. 당학회 조사이사, 부회장.



임기조(林基祚)

1952년 5월 20일생. 1973년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1979년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1977년-81년 국방과학연구소. 현재 충북대 공대 전기공학과 교수. 당 학회 편집이사.



구자윤(具滋允)

1951년 2월 7일생. 1975년 서울대 공과대학 전기공학과 졸업. 1980년 프랑스 ENSEEIHT 졸업(석사). 1984년 프랑스 ENSIEG 졸업(박사). 1980년-83년 프랑스 CNRS-LEMD 연구원. 1983년-84년 프랑스 EDF 연구원(Post-Dr). 1985년-88년 한국과학기술원(계측소자연구실) 선임연구원. 1988년 -현재 한양대 공대 전기공학과 부교수.



강성화(姜聲華)

1963년 2월 22일생. 1987년 충북대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991년-93년 생산기술연구원(KAITECH) 연구원. 1993년-현재 충청전문대 산업안전과 조교수.