

고전압 회전기의 절연진단 기술

김진구

한국전력공사 중앙교육원 품질교육팀

1. 머리말

전력설비 용량의 증가와 기술의 진보에 따라 터빈 발전기, 수차발전기, 대형 전동기 등의 회전기가 대용량화, 고전압화, 소형경량화됨에 따라 절연 고장 예방을 위한 절연진단이 중요시되고 있다. 이들 회전기 고장의 대부분은 권선 소손이며 절연체 중에서 가장 중요한 부분은 고정자인 전기자 권선이다. 고정자의 절연 고장은 복구하는데 장시간이 요구되므로, 회전기의 예측진단에 따른 정비와 더불어 고장을 미연에 발견하고 불시정지에 따른 파급을 막기 위해서는 상시감시가 요구된다.

고정자 권선에 고전압이 인가될 때 절연재료 내부에 있는 공극에서 부분방전이 발생되므로 부분방전은 절연재료의 열화정도를 판정하는데 중요한 요소가 된다. 따라서 운전중 회전기의 고정자 권선에서 부분방전을 측정하기 위해서 대용량 고압 전동기 및 발전기에 커플러(Couplers)를 설치하고 부분방전을 감시함으로써 고정자 권선의 절연진단을 수행하고 있다.

절연열화 상태를 진단하는 연구는 1980년대 후반부터 본격적으로 시작되었다. 처음에는 부분방전분석기(PDA: Partial Discharge Analyzer)를 이용하여 수력 발전기의 고정자 권선의 절연진단을 수행하였으며 1990년대 초부터는 터빈발전기 분석기(TGA: Turbine Generator Analyzer)가 개발되어 화력 발전기에 확대 적용되고 있다.

이러한 회전기 절연열화의 종류와 절연열화 진단을 통한 회전기의 신뢰성을 확보하기 위한 정지중(Off-line) 및 운전중(On-line)의 절연진단방법을 소개하고자 한다.

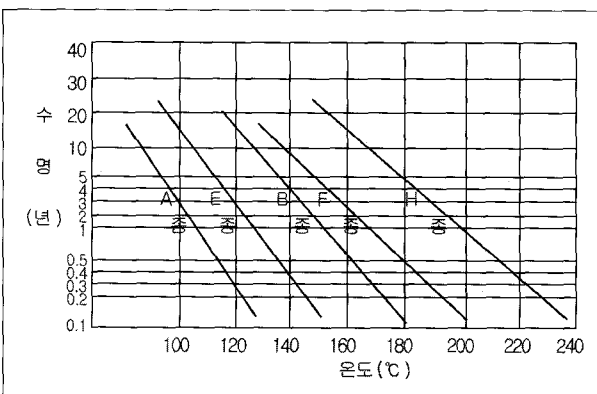
2. 회전기 권선의 절연 열화

회전기는 각종 스트레스에 의해 절연체 중의 유기질 성분의 분자구조가 변하고 절연층 자체에 기포나 균열이 발

생하는 등 본래의 절연성능을 저하시키는 현상이 발생하는데 이것을 “절연열화 현상”이라고 한다. 회전기의 절연열화 현상은 다양하지만 열화 요인을 분류하면 ① 열적 열화, ② 전기적 열화, ③ 기계적 열화, ④ 환경적 열화 등으로 분류할 수 있으며 열화는 이러한 요인이 복합적으로 작용하여 진행된다.

가. 열적 열화

운전중 권선의 발열에 의한 산화열화 또는 열분해로 절연특성이나 절연층의 기계적 강도 등이 저하하는 현상을 “열적 열화”라 한다. 열화 원인에 있어 온도 변화가 기계적 응력을 일으키지만, 단지 온도만으로 절연재료에 손상을 일으킬 만큼 충분히 높은 온도상승은 일어나지 않는다. 그러나 열적 열화는 현재 사용하는 고정자 권선에 있어 아직도 중요한 요소로 고정자, 회전자 및 성층철심 절연 재료에서 발생한다. 고정자 철심은 고정자와 회전자 권선에서 발생하는 동손에 의해 간접적으로 영향을 받음 뿐만 아니라 성층철심에서 철손에 의해 가열된다. 또한 회전기에 사용되는 모든 절연 및 보강재료는 권선에서 발생하는 열에 의해 시간이 지남에 따라 열화가 진행된다. 그러므로 각각 구성하고 있는 재료의 열화 속도는 그림 1 과 같이 열 특성과 가해지는 온도에 의해 결정되며, 고정



〈그림 1〉 절연재료 온도와 수명의 관계

자 절연재료의 주된 열 발생원은 고정자 권선의 도체에서의 줄열(I^2R) 손실이다.

나. 전기적 열화

회전기 권선에서 절연재료의 절연내력이 정격전압 혹은 과도전압에 더 이상 견디지 못할 정도로 약화되면 권선이 파괴에 이른다. 이러한 전기적 열화에는 부분방전, 도체표면방전, 주절연 내부방전, 슬롯방전 및 단말권선방전이 있다.

(1) 부분방전

부분방전은 고체절연재료 내부에 존재하는 기체에 의해 미소 공극의 절연이 파괴되는 현상으로 주로 절연체의 전계가 집중되기 쉬운 도체 근방에서 발생하며, 열화진전이 빠른 유기물질, 결합재(폴리에스터, 에폭시, 아스팔트), 합성이나멜 등에서 시작하여 마이카와 석면 같은 무기재료로 발전하여 결국 절연파괴에 이른다.

(2) 도체 표면방전

도체 표면방전은 주절연과 소선절연 사이에서 미소 공극에 의해 발생하며, 주절연 내부의 방전과 주절연내의 미소 공극은 제조시 바니시나 수지의 부적절한 함침 혹은 절연층의 박리에 의해 발생된다.

(3) 슬롯방전

슬롯방전은 권선 표면의 코일과 슬롯의 상대적인 움직임으로 마모되어 반도전층을 손상시켜 일부 권선의 접지 상태가 나빠지고 권선 표면에 전하가 축적되어 철심과 권선 사이에서 발생하는 방전으로 고정자 권선의 주절연을 급격히 열화시킨다.

(4) 단말권선방전

단말권선방전은 회전기의 단말권선부 사이 또는 다른 상과의 연결지점에서 전압 차로 인해 부분방전이 발생되며 단말권선이 열화된다.

다. 기계적 열화

기계적 열화는 회전기의 과도한 진동과 기계적 스트레스에 의한 손상으로 회전기의 기동정지, 급격한 부하변동으로 인해 정상운전 혹은 과도상태에서 고정자권선에 나타나는 전자력에 기인한다. 이와 같이 주기적인 전자력에 의해 슬롯 내에서 권선이 움직이며 굽힘과 압축에 의해 도체와 주절연에 스트레스가 가해지고 절연재료가 마모된다.

라. 환경적 열화

환경적 열화는 고정자 권선 표면이 여러 가지의 화학약품, 유독가스, 분진, 수분 및 기름 등에 놓여있기 때문에 단말 권선의 절연층 표면에 도전성 물질이 부착됨으로써 일어난다. 특히 발전기 정지중에 수분과 먼지가 흡수되어 절연층 열화에 크게 영향을 미친다. 일반적으로 환경적 열화는 수력발전기에서 많은 영향을 받지만, 화력발전기는 수소가스 봉입의 밀폐 형식으로 운전되므로 환경적인 열화를 거의 받지 않는다. 그러나 화력발전기도 분해점검 시 장시간 노출에 의한 환경적인 열화를 받을 수 있으므로 주의할 해야 한다.

3. 정지중 절연진단기법

정지중의 고정자권선 절연진단은 회전기의 제작시와 사용중으로 나눌 수 있는데 제작시 절연진단은 정격전압에서 아무런 고장 없이 사용 가능한가의 여부를 판정하기 위해 정격전압보다 높은 전압을 인가하는 고전압절연내력시험이고 사용중 절연진단은 회전기 사용중에 절연상태를 판정하는 방법으로 절연저항시험, 직류전류시험, 교류전류시험, 유전정접시험 및 부분방전시험 등이 있다. 위에 2가지 절연진단방법 중에서 설비 운영과 관련된 사용 중 절연진단방법은 다음과 같다.

가. 절연저항 시험

절연저항시험은 절연물의 흡습이나 오손상태를 파악할

수 있으며, 회전기가 운전에 필요한 충분한 절연저항을 가지고 있는가의 여부, 운전에 따른 절연저항 저하의 정도를 점검하는 시험으로 미국 EPRI(Electric Power Research Institute)에서 제시한 판정기준에 의하면 인가 전압에 관계없이 1,000(V) Megger의 경우, 고정자 권선의 허용 최소 절연저항은 「정격 선간전압(E)+ 1」(MΩ) 이상이다.

나. 직류전류시험

직류전류시험은 직류전압을 인가했을 때의 전류-시간 특성으로부터 절연물의 흡습, 도전성 불순물의 흡입, 생성, 오손과 절연물의 결합 등 절연물의 상태를 판정하는 시험으로 성극지수시험이라고도 한다. 전류의 크기는 시료의 형태와 크기에 따라 변하기 때문에 전류의 크기만으로 판단할 수는 없다. 절연물이 열화되거나 흡습되면 누설전류가 증가하므로 전류-시간 특성곡선에서는 누설전류의 상승으로 전류의 감쇄율이 낮아지게 된다. 이러한 특성을 이용하여 전류의 시간 변화를 나타내는 지표로서 식(1)과 같은 성극지수(P.I.: Polarization Index)를 이용하여 절연물의 흡습과 오손을 판정한다.

$$\begin{aligned} \text{성극지수(P.I.)} &= \frac{\text{전압인가 1분후의 전류}}{\text{전압인가 10분후의 전류}} \\ &= \frac{\text{전압인가 10분후의 절연저항}}{\text{전압인가 1분후의 절연저항}} \dots\dots(1) \end{aligned}$$

절연상태는 성극지수가 2보다 클 권선상태가 건조하고 깨끗하며, P.I. 값이 1에 접근할수록 권선표면에 습기가 많고 오손상태가 심하여 고정자 권선 표면의 절연상태가 불량하다고 판정한다.

다. 교류전류시험

교류전류시험은 절연물에 교류전압을 인가했을 때 흐르는 전류와 전압과의 관계, 즉 I-V 특성으로부터 절연상태를 평가하기 위한 시험으로 교류전압을 절연물에 인가하면 전압상승에 비례하여 충전전류가 증가하며, 이때 절연층 내에 결함이 존재하여 부분방전 현상이 발생하게

되면 미소공극을 단락시켜 충전전류가 급격히 증가한다. 이러한 전류 급증전압 및 전류급증률로부터 절연물의 흡습 및 열화의 정도를 알 수 있다.

비교적 열화가 진전된 절연물에 교류전압을 인가했을 경우, 인가전압이 높아져 부분방전이 발생하면 전류는 일정하게 증가하지 않고, 그림 2와 같이 급증하게 된다. 이와 같이 전류가 급증하는 점의 전압을 전류급증전압이라 부르며, 2개의 전류 급증점이 존재할 경우 낮은 전압점은 제1전류 급증점, 높은 점을 제2전류 급증점이라 한다. P_{11} 은 미소공극 내 방전에 기인하는 것으로서 부분방전 개시전압이나 $\tan \delta$ 증가전압과 비교적 일치하는 경향이 있고, P_{12} 는 미소공극의 섬락에 기인하는 것으로서 파괴전압과 상관관계가 있다.

교류전류 시험에서의 전류-전압 특성에 있어서 절연진단 시험에 사용되는 패러미터는 식(2)와 같이 정의되는 전류증가율(ΔI)을 사용한다.

$$\Delta I = \left(\frac{I - I_0}{I_0} \right) \times 100(\%) \dots \dots \dots (2)$$

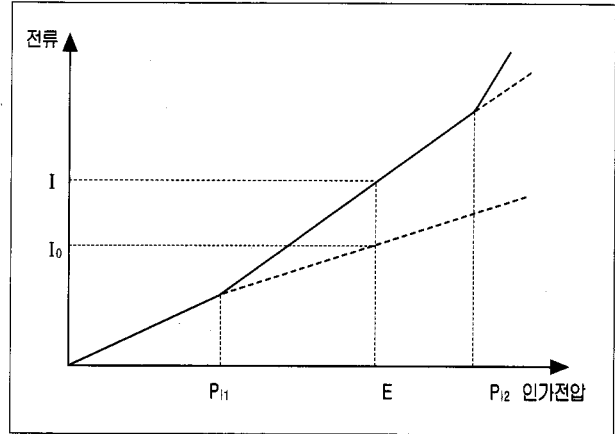
여기서 I : 정격(단자)전압(E) 인가시 흐르는 전류
 I_0 : 전류가 직선적으로 증가한다고 가정할 경우 정격전압에서의 전류

일본에서의 교류전류시험결과에 대한 판정기준은 정격전압이 11kV 이상인 고정자 권선의 경우 1.25배(1.25 × E/√3kV)의 측정 전압에서 교류전류의 변화상태(ΔI)가 5% 미만이면 양호하다고 판정하고 있다.

라. 유전정점(tanδ) 시험

절연물에 교류전압을 인가하면 일반적으로 전압에 대하여 90° 위상이 앞선 충전전류와 전압과 동상인 누설전류가 흐른다. 유전정점은 충전전류를 누설전류로 나눈 값으로 절연물에 교류전압을 인가하여 측정되는 tan δ로부터 흡습, 건조, 오손, 미소공극 유무 등의 절연상태 및 열화정도를 측정할 수 있다.

tan δ는 절연물의 특성치로서 전기적 손실 정도를 나



〈그림 2〉 교류전류-전압(I-V) 특성

타내며, 절연재료가 매우 양호할 경우 인가전압이 증가하여도 tan δ는 증가하지 않으나 고정자 권선의 주절연 혹은 주절연과 철심 사이에 공극이 존재할 때 고전압이 인가되면 이들 공극에서 부분방전이 발생하여 열과 빛을 생성하기 때문에 에너지를 소비하며 이로 인하여 권선내 전기적 손실이 증가한다. 그 결과 전압이 증가함에 따라 tan δ도 증가하며 $\Delta \tan \delta$ 가 증가하게 되면 부분방전도 증가하게 되므로 tan δ 시험은 부분방전의 발생상태를 간접적으로 나타내는 척도가 된다.

미국에서는 정격 상전압(E/√3)의 25%~100% 전압에서 측정된 tan δ 차이를 $\Delta \tan \delta$ 로 나타내고, 이때 Epoxy-Mica 절연 권선의 경우 1% 미만이면 양호하다고 판정하고 있으며, 일본의 경우에는 1.25E/√3kV에서 2.5% 이상이 되면 불량한 것으로 판정하고 있다.

마. 부분방전시험(Partial Discharge Test)

대형 고전압회전기 고정자 권선의 경우 사용시간의 증가로 인해 권선이 열화되어 절연물에 미소공극, 균열, 박리 등이 생기면 이 결합부에서 부분방전 펄스 전류가 발생하는데 이 부분방전을 검출하여 전기적인 절연물의 열화상태 뿐만 아니라 과열이나 주기적 응력에 의한 권선 단말부에서의 표면방전, 웨지 이완 그리고 슬롯방전 등의

이상상태도 신뢰성 있게 판별할 수 있다고 알려져 있다. 절연물내의 국부적인 열화를 검출하는 수단으로서는 최대부분방전 전하량(Q_m)을 사용하고 일반적으로 절연열화가 진행되면 방전전하가 커지고 방전발생개수(빈도) 또한 증가하여 Q_m 이 커지면 절연 파괴전압이 저하되는 관계를 이용해서 절연열화의 정도를 판단한다.

부분방전 개시전압(DIV: Discharge Inception Voltage)은 절연물 내에 존재하는 미소공극 등의 결함부분 중 가장 낮은 전압에서 방전하는 결함부의 방전개시전압을 나타내는 것으로서, 일반적으로 500pC 또는 1000pC 크기의 방전량이 발생할 때의 전압을 기준으로 삼고 있으며, 슬롯방전이 발생하는 것을 감지할 수 있다.

표 1에 보이는 바와 같이 1989년도 미국 EPRI에서 발간된 보고서에 수록된 판정기준은 고정자 권선에 대한 부분방전 시험에서의 절연상태 판정기준은 $E/\sqrt{3kV}$ 에서의 최대 부분방전 전하량(Q_m)이 10,000pC 이하이면 수년 안에는 권선이 절연파괴되지 않으며, 10,000pC을 초과하면 육안검사를 수행해야 한다고 밝히고 있으며, 부분방전 개시전압이 정격상전압 $E/\sqrt{3kV}$ 의 1/2 이하일 때에는 슬롯방전이 발생하고 있다고 판정한다.

한편, 일본에서는 Q_m 이 10,000 ~ 30,000pC일 경우에 요주의, 30,000pC 이상일 경우에는 권선의 절연상태가 불량하다고 판정하고 있다.

〈표 1〉 EPRI 보고서에서 제안된 고정자권선의 절연열화 판정기준

측정방식	측정항목	불량판정기준		불량판정
		Asphalt	2 이하(표면오손)	
Off-line	P.I.	Epoxy	1분후 저항>1000MΩ : 실시 안함	On-line의 Q_m , NQN 기준을 모두 초과할 경우에만 Off-Line 진단을 실시함
			1분후 저항<1000MΩ : 1 이하	
	D.I.V.	(E/√3kV)의 1/2 이하(슬롯방전)		
	Q_m (E/√3kV)	10,000pC 이상		
	$\Delta \tan \delta$ (E/√3kV)	1% 이상		
On-line	Q_m NQN	Q_m 과 NQN이 연속적으로 6개월에 2배 이상 증가		

4. 운전중 고정자 권선의 절연진단

운전중에 발전기 절연진단을 위한 부분방전시험은 시험비용을 절감할 수 있고 필요시 시험을 수행할 수 있어, 절연열화의 문제점과 발생원인을 규명하여 정비가 필요한 기기를 찾아낼 수 있다. 특히 고정자 슬롯에서 코일의 헐거워짐과 같은 특정한 문제점은 부분방전 시험에 의해서만이 검출이 가능하다.

가. PDA의 특성

PDA는 캐나다 Ontario Hydro의 연구소 주관으로 특별한 센서 PDA 커플러를 제작하여 외부 전기노이즈를 감소시켜, 운전중 진단기술의 신뢰성을 향상시켰고, 1980년대 중반부터 상용화하여 전세계에 보급되고 있다.

PDA는 커플러로부터 고정자 권선내 부분방전 신호를 도출하고 한 개 커플러로부터 부분방전의 펄스 크기를 분석하는데 수평축은 mV 단위의 부분방전의 크기이고 수직축은 수평축에 대응하여 펄스 크기에 대한 초당부분방전의 개수이며 두 개의 정, 부극성 부분방전이 동시에 기록된다. 결과에 대한 해석의 신뢰성을 높이기 위해 권선 내에서 발생하는 방전량은 NQN(Normalized Quantity Number)에 의해 평가된다.

나. 부분방전의 패턴에 의한 진단법

출력전압이 정극성일 경우는 부극성의 부분방전, 그리고 출력전압이 부극성일 경우는 정극성의 부분방전이 발생한다. 이러한 이론을 근거로 4가지 패턴을 설명하면 다음과 같다.

(1) 소선 및 Turn 도체와 주절연간 손상시의 부분 방전

도체표면이나 그 가까에서 주로 열화되어 소선 절연간 파괴, 턴절연간 파괴, 그리고 소선 및 턴도체와 주절연경계면간의 절연파괴시로 부극성 부분방전의 크기가 크다.

(2) 주절연 내부의 박리 및 공극에 의한 부분방전

극성의 크기가 거의 같으며 유전체 전극 사이의 방전에 해당되는 주절연 내부의 절연테이프 박리현상 또는 내부의 공극에 의한 부분방전일 경우 극성의 영향은 거의 나타나지 않음을 보여주고 있다. 이때 부하에 의한 것보다 온도에 의한 열 열화나 부하변동에 의한 부분방전의 변화가 크다.

(3) 반도체층의 손상에 의한 부분방전

주절연 표면의 반도체층절연이 파괴되어 고정자 슬롯 내에서 방전이 발생하거나 Bar 코일과 슬롯 사이 혹은 슬롯외부 End Winding 부분의 표면방전일 경우로 정극성 부분방전이 크게 나타난다.

(4) 권선 및 웨지 이완에 의한 부분방전

고정자권선과 웨지의 이완 여부는 부하전류의 증가에 따라 권선 진동폭이 커지고 부분방전의 크기가 증가하는 현상으로 판정할 수 있다.

다. NQN에 의한 절연진단

절연손상의 정도를 나타내는 NQN의 정의는 부분방전을 측정할 때 나타나는 그래프의 면적으로 물리적 의미는 일정 시간내의 부분방전량을 합계한 값이다. NQN은 정극성의 부분방전을 기준으로 하여 손상상태를 판정하고 정비의 방법 및 시기를 결정하는데 사용한다. 부극성 NQN은 내부방전 및 도체절연 간의 방전을 나타내고, 이로 인한 손상은 정비가 불가능하여 완전히 새 권선으로 교체하여야 하기 때문이다. 또한 NQN 값만을 사용하여 권선의 손상상태를 판정하는 것은 아니며, 부하에 따라 변화하는 정도가 고려되어야 한다.

NQN이 매 6개월 정도마다 두 배 이상씩 증가하며, 절연열화가 촉진되고 있다고 판단되며, 몇 년 동안 급격히 증가하다 평형되거나 감소하면 권선사고가 날 확률이 커진 것이다.

라. PDM의 특성

PDM(Partial Discharge Meter)은 회전기 고정자 권선에서 발생하는 부분방전의 크기를 현장에서 전문적인 지식 없이도 돌발적인 상태변화를 항상 감시할 수 있는 상시감시설비이다.

마. TGA의 특성

TGA는 가압 수소 중에 있는 발전기의 고정자 권선에서 발생하는 부분방전을 슬롯과 웨지 사이에 삽입한 커플러에 의하여 발전기 운전중에 권선의 이상유무를 진단하는 장치로 사고예방의 효과 및 진단결과에 대한 신뢰성이 인정되어 점차 확대 적용되고 있다.

5. 맺음말

전기품질을 제고하고 전력설비의 고장에 의한 경제적 손실을 줄이기 위해서는 발전기 및 대형 전동기 등의 회전기의 신뢰성이 확보되어야 한다. 권선의 절연 열화는 열적, 전기적, 기계적 및 환경적 요인이 복합적으로 작용하여 발생하므로 발생 원인의 제거와 발전기의 절연상태를 항상 감시하여 적기에 대처해야 한다. 발전기 고정자 권선의 절연재료와 절연처리방식의 발전과 내구성 및 안정성의 증가로 신뢰성도 크게 좋아지고 있으나 철저한 절연진단에 의거 권선의 절연열화는 미연에 방지되어야 할 것이다. ❑

〈참고문헌〉

1. 발전기 수명평가 및 진단시스템 개발, 한전 전력연구원, 1997.8
2. 발전기 고정자 권선에서 절연재료의 물성과 절연평가, 홍익대학교 박사학위논문, 김희동, 1988.6
3. 전기학회지, 제45권, 1996. 4
4. 회전전기기기의 절연진단 기술 연구, 한전 기술연구원, 1989.3
5. 수차발전기 고정자권선에서의 운전중 및 정지중 절연특성 분석, 한양대학교 석사학위논문, 김진구, 2000. 6