

고압회전기기 고정자권선의 Off-line 진단을 통한 신뢰성 평가

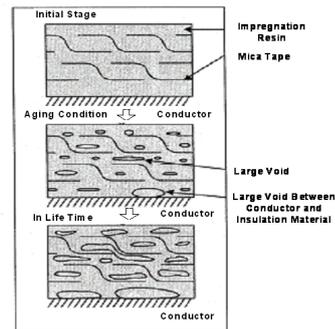
장정호*, 임재일*, 이동근*, 이흥호**
K-water*, 충남대학교**

Reliability Assessment of High Voltage Rotating Machine Stator Windings Through Off-line Diagnosis

Jeong-Ho Chang*, Jae-Il Lim*, Dong-Keun Lee*, Heung-Ho Lee**
K-water*, Chugnam National University**

Abstract - 산업현장에서는 회전기기의 고체절연시스템(solid insulation system)의 열화정도를 평가하기 위하여 일정 진단주기에 맞춰 Off-line 상태에서 직류시험 및 교류시험을 통하여 효과적으로 절연물에 대한 상태평가를 시행하고 있다. 직류시험으로는 절연저항, 성극지수(PI) 시험 등이 있으며 교류시험으로는 교류전류시험(ΔI), 유전정접시험($\Delta \tan \delta$), 부분방전(PD)시험이 있다. 여기서 부분방전은 절연체의 국부적인 열화현상을 추정할 수 있는 중요한 파라미터로, 부분방전시험(PD test)을 통하여 고정자권선(stator winding)에 대한 절연특성을 효과적으로 진단할 수 있다. 고압 전동기는 기동정지의 빈번함과 장기간 운전에 의해 열적, 전기적, 기계적 스트레스를 받게 되고, 이로 인해 과열, 진동, 절연파괴에 이르는 문제점이 발생되어 결국 시스템의 운전정지를 초래하는 심각한 사고로 이어질 수 있다. 따라서 고압 전동기의 절연상태를 주기적으로 감시하고 사고 징후를 검출하여 시스템을 안정적으로 운영하기 위한 고압 전동기 Off-line 절연진단에 대하여 기술하고 수차발전기에 대한 절연상태진단 결과를 바탕으로 절연시스템의 신뢰성 평가 방법에 대하여 고찰하고자 한다.

화는 이러한 요인이 복합적으로 작용하여 진행된다.



<그림 1> 회전기 절연체의 보이드 생성

1. 서 론

전력설비의 절연파괴사고에 의한 정전 시 손실은 막대하게 발생하며 이를 사전에 방지하기 위하여 설비에 대한 정밀절연진단을 수행하고 있다. 고전압의 회전기기를 사용하고 있는 산업시설은 전력생산, 용수공급, 제철생산 등 매우 중요한 사회적, 경제적 역할을 수행하고 있으므로 이에 대한 절연진단시험은 안정적인 설비 관리를 위하여 꼭 필요한 요소가 된다. 대부분의 전력설비의 수명은 수 십년 동안 지속되도록 설계·제조되고 있으나 여러 가지 원인으로 갑자기 절연파괴 되는 설비가 있으며 이것이 과급되어 대형 사고로 이어지는 경우가 있다. 따라서 이러한 돌발사고를 예방하고자 최근에는 전력기기의 정확한 수명평가가 가능한 기술이 요구되고 있으며 이에 대한 많은 방법이 제안되고 연구되고 있다. 본 논문에서는 회전기기에 적용되는 절연진단시험에 대하여 소개하고 Off-line 진단데이터의 분석과 상태평가 방안에 대하여 기술하고자 한다.

2. 본 론

2.1 고정자권선의 절연열화

회전기기 등의 고압 권선의 주절연물은 절연내력 및 내아크성이 높으며 유전손실이 우수하고 내습성 및 기계적 강도가 우수한 재료가 요구되며 주로 마이카(운모)에 결합제와 보강재를 혼합하여 테이프 형태로 제작되며 다층구조로 이들의 간극에 에폭시 등의 열경화성 수지를 채워서 제작하고 있다. 이러한 회전기 권선의 절연은 운전중에 전기적, 열적 히트사이클, 기계적 충격 등의 다양한 열화 원인과 제작과정 등에 의하여 보이드가 발생하게 되며 이러한 보이드는 열화 진행에 의하여 더욱 커지게 된다. 절연재료 내부의 공극에서는 고전압이 인가되면 부분방전이 발생하므로 부분방전은 절연재료의 열화정도를 분석하는데 중요한 요소가 된다. 따라서 운전 중 회전기기의 고정자 권선의 부분방전을 측정하기 위하여 On-line 부분방전시스템이 설치되어 운영되고 있으며 운전 중 상시 감시를 통하여 권선의 건전성 여부를 파악하고 있다. 다만 운전 중 감시시스템은 진단보다는 감시에 중점을 두고 있으므로 정밀진단을 위하여 정지상태에서 Off-line 진단시험을 통하여 고정자 권선의 상태평가를 수행할 수 있다.

2.2 열화의 종류

회전기기가 외부환경의 스트레스에 의하여 절연체 중의 유기질 성분의 분자구조가 변하고 절연층 자체에 기포나 균열이 발생하여 절연성능을 저하시키는 현상을 절연열화현상이라고 하며 이러한 현상의 원인은 열적 열화, 전기적 열화, 기계적 열화, 환경적 열화 등으로 분류되며 열

2.3 Off-line 절연진단 시험

고정자 권선에 대한 절연진단은 제작시험과 사용 중 시험으로 분류되며 제작시험은 공장 출고 시 정격전압에서 사용 가능여부를 판정하기 위하여 정격전압보다 높은 전압을 인가하는 절연내력시험이며, 사용 중 절연진단 시험은 현재 사용중인 회전기기의 절연상태를 판정하는 전기적 특성시험으로 직류절연저항시험, 직류흡습전류시험, 교류전류시험, 유전정접시험, 부분방전시험 등이 있다. 직류시험전압을 인가하여 시험하는 절연저항과 성극지수 시험은 노출된 권선표면의 오손과 습기를 감지할 수 있는 시험방법으로 권선이 균열되거나 파괴된 경우 더욱 민감하게 측정된다. 절연저항측정은 직류시험전압 인가 후 일정시간(통상1분)이 경과하는 순간의 값을 측정하여 40℃의 온도로 환산한 후 평가한다. 성극지수시험은 직류시험전압을 인가했을 때의 전류-시간 특성으로부터 절연물의 흡습, 도전성 불순물의 흡입, 생성, 오손 등 절연물의 상태를 판정하는 시험이며 누설전류의 변화량(누설전류 1분측정값/10분측정값)으로 성극지수를 계산하여 2이상일 경우 양호하며, PI값이 1에 근접할수록 권선의 절연상태가 흡습하며 불량하다고 판정한다.

교류전류시험은 권선절연물에 교류전류시험은 교류전압을 인가했을 때의 I-V 특성으로부터 절연상태를 평가하는 시험으로 절연물 내 결합이 존재하여 부분방전이 발생하면 미소공극을 단락시켜 충전전류가 급격히 증가하는데 이러한 전압 및 전류 급증률로부터 절연물의 열화정도를 분석할 수 있다. 유전정접시험에서 사용되는 유전손실계수(Dissipation factor, $\tan \delta$)는 권선 절연물의 특성값이며 절연물의 전기적 손실정도를 측정하는 시험이다. 절연물에 교류전압을 인가하면 일반적으로 전압에 대하여 90° 위상이 앞서는 충전전류와 전압과 동상인 누설전류가 흐르며 유전정접은 충전전류를 누설전류로 나눈 값으로 이것으로부터 흡습, 건조, 오손, 미소공극 유무 등의 절연물에 대한 전체적인 열화정도를 측정할 수 있다. $\tan \delta$ 는 절연재료가 양호할 경우 인가전압의 증가에 따라 증가되지 않으나 주절연 내 혹은 주절연과 철심사이에 공극이 존재하여 고전압 인가 시 부분방전이 발생하면 열과 빛을 생성하기 때문에 에너지 소비로 인하여 권선 내 전기적 손실이 증가하며 이에 따라 $\tan \delta$ 도 증가하며 이로 인하여 부분방전도 증가하므로 부분방전을 간접적으로 나타내는 척도가 된다. 고전압 회전기기의 고정자권선에서 절연물에 미소공극, 균열,バリ 등의 손상이 발생하면 이 부분에 고전계가 형성될 경우 부분방전 펄스 전류가 발생하는데 이를 검출하는 부분방전시험은 전기적인 절연물의 열화상태와 과열이나 기계적 응력에 의한 권선단말부에서의 표면방전, 웨트 이완 그리고 슬롯방전 등의 이상상태도 신뢰성 있게 판별할 수 있다.^[1] 국부적인 열화를 검출하는 파라메타로 최대부분방전 전하량(Q_m)을 사용하며 절연열화가 진행되면 방전전하가 커지고 방전발생개수 또한 증가하여 절연파괴전압이 저하되는 관계를 이용하여 절연열화 정도를 평가한다.

2.4 절연열화 평가

평가 대상 회전기기는 100MW급 수차발전기로 절연열화 판정기준에 의한 절연상태평가와 절연내력추정에 의한 절연상태평가를 시행하여 기기의 건전성 여부를 추정하였다. 절연열화 판정기준에 의한 평가는 현재까지 연구된 판정기준을 근거로 양·불량을 평가하는 절연진단 초기부터 적용된 고전적 절연상태평가 방법으로 과거 진단데이터의 변화추이 분석을 통하여 기기 상태를 평가한다. 절연내력추정에 의한 상태평가는 부분방전과 누설전류를 평가 인자로 분석하는 방법으로 현재의 절연내력 정도를 평가하여 잔존 절연내력의 정도를 추정하는 기법이다.

3. 결과 및 검토

3.1 절연열화 판정기준에 의한 상태평가

절연열화 평가를 위한 판정기준에 의한 상태평가 결과는 다음과 같다.

〈표 1〉 진단대상 설비 특성

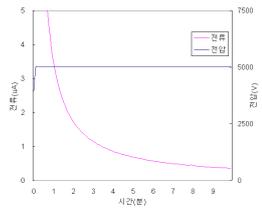
설비용량	경계전압	절연계급	사용연수	기동횟수	운전시간
110MVA	15.4kV	B	17년	14,232	50,496

3.1.1 직류시험 결과

고정자권선 절연물에 대한 직류시험 절연저항시험과 성극지수 시험 결과는 표 2와 같다. IEEE43-2000에서는 절연저항 측정값을 40℃로 환산하여 100[MΩ] 이상이면 양호한 상태로 판정한다.^[2] 성극지수시험 결과 2.0 이상이면 양호한 절연물로 판정하며 절연저항값이 5,000[MΩ] 이상으로 큰 값이면 성극지수는 절연상태 평가지표로서 의미가 없음을 나타내고 있다.^[3]

〈표 2〉 직류전압시험 결과

구분	절연저항(MΩ)	성극지수
고정자 권선	237	10.5



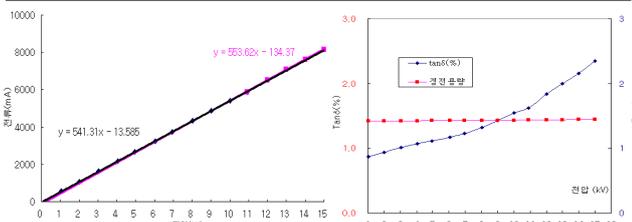
〈그림 2〉 성극지수 시험결과

3.1.2 교류전압시험 결과

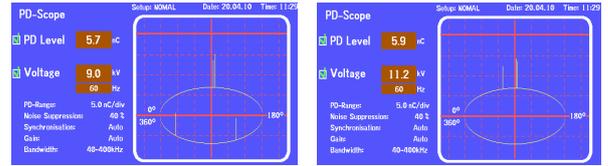
교류전압을 인가하여 평가할 수 있는 시험항목으로 교류전류시험, 유전정접시험, 부분방전시험이 있으며 각각의 진단 결과는 표 3과 같다.

〈표 3〉 교류전압시험 결과

시험항목	절연특성값		인가전압	판정기준	결과
	전류	ΔI ₁			
교류전류	전류	ΔI ₁	1.25 E/√3	<5.0	없음
	증가율(%)	ΔI ₂			
유전정접	tanδ ₀ (%)		2kV	<10	0.94
	Δtanδ ₁ (%)		1.25 E/√3	<2.5	0.68
	Δtanδ ₂ (%)		E	<6.5	1.41
	C ₀ (μF)		2kV	-	1.421
	R ₁ C ₀ (ΩF)			>100	336.61
부분방전	tanδ ₀ /R ₁ C ₀ (%/ΩF)			<0.05	0.00279
	Q _{max} (pC)	Q _{m1}	E/√3	<10,000	5,700
		Q _{m2}	1.25 E/√3	-	5,900
	Nq(Q _m -V)		1.25 E/√3	>2.0	0.15
절연내력추정전압 V _{BD} (kV)			≥27.4	3.73	
(V _{BD} /E)			(≥2.08)		



〈그림 3〉 교류전류시험 및 유전정접시험 결과



〈그림 4〉 부분방전시험 결과

그림 3의 교류전류시험에서는 전류급증점은 거의 존재하지 않았으며 유전손실계수를 측정하여 권선의 전체적인 열화상태를 평가한 결과 기준에 적합한 양호한 상태를 보이고 있다.

그림 4는 권선의 국부적인 열화현상을 판정할 수 있는 부분방전시험 결과이며 운전전압에서의 최대부분방전량은 기준에서 제시하는 10,000 [pC] 이하의 양호한 절연특성을 보이고 있다.

3.2 절연내력추정에 의한 절연상태평가

절연내력추정에 의한 고정자권선의 절연상태평가는 일본 전력중앙연구소에서 제시하는 회전기의 잔존수명을 구하는 방법으로 최대부분방전전하량(at E/√3)과 누설전류를 기준으로 절연내력 정도를 추정할 수 있는 절연내력식과 D-map 방법이 있다.

여기서 추정절연내력 계산식은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$V_{BD}/E = 12.0 - 2.21 \log Q_m - 280 (\tan \delta_0 / R_1 C_0)^{2.0} \quad (1)$$

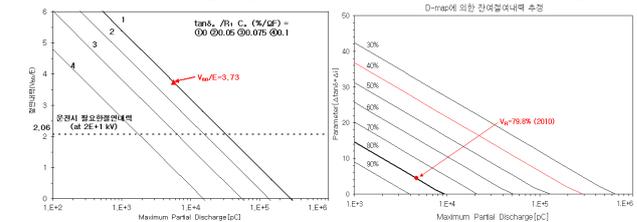
평가대상 시험기기의 절연특성값은 다음과 같다.

$$Q_m : 5,700 [pC] \quad \tan \delta_0 / R_1 C_0 : 0.00279 [\% / \Omega F]$$

따라서, 추정절연내력값은 다음과 같이 계산된다.

$$3.73 = 12.0 - 2.21 \log (5,700) - 280 (0.00279)^{2.0}$$

운전에 필요한 절연내력(V_{BD}/E)은 절연내력시험전압(2E+1kV)에서 2.06로 구해지며 추정절연내력값은 3.73으로 기준을 초과한다.



〈그림 4〉 비파괴 전기특성에 의한 절연내력 추정방법

D-map에 의한 절연강도를 평가하는데 사용되는 식은 다음과 같으며 고체절연물에 심각한 고장을 일으키는 부분방전 정보량 등을 이용한다.

$$V_R = 100 - 1.8 (\Delta \tan \delta + \Delta C / C_0 - 0.8) - 27.4 \log \frac{Q_m [pC]}{1500} \quad (2)$$

$$\Delta C / C_0 = C - C_0 \quad [\text{정전용량 } C (\mu F) \text{ at } E, C_0 (\mu F) \text{ at } 2kV]$$

〈표 4〉 D-map Parameter

ΔC/C ₀	Δtanδ	Δ합	Q _m (pC)	V _R (%)
1.759	1.41	3.169	5,700 × 10 ⁻¹²	79.8

IEC standard 216에 의하면 『절연물의 수명점은 절연과피전압 초기치의 50% 저하점』으로 정의하고 있다. 그러나 실제 고전압설비는 정량적 산출결과에 대해 어느 정도 분포형태를 나타내므로 초기치의 40%인 경우를 수명 연한의 최종단계에 도달한 것으로 판정한다. 따라서 D-map법에 의해 발전기 고정자권선의 잔여 절연강도를 구하면 신품 설비를 100%로 기준으로 볼 때 79.8%의 절연내력을 갖고 있으며 평가기준인 40%에 비하여 상당히 양호한 상태를 나타내고 있다.

3. 결론

대용량의 고전압 회전기 고정자권선에 대한 절연진단시험 방법과 이에 이용한 상태평가방법에 대하여 고찰하였다. 회전기기에 대한 절연진단은 안정적인 자산관리에 있어서 매우 중요한 역할을 수행하므로 향후 관련분야에 대한 지속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

[참고 문헌]

- [1] 김진구, "고전압 회전기의 절연진단 기술", 전기저널, pp48, 2000.11
- [2] IEEE43-2000, "IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery"
- [3] H. Yoshida, K. Umemoto, "Insulation Diagnosis for Rotating Machine Insulation", IEEE Trans. Elec. Ins, Vol. EI-21 No. 6. 1986