

Characteristics of Insulation Aging in Large Generator Stator Windings

김 회 동[†] · 이 영 준* · 주 영 호**
(Hee-Dong Kim · Young-Jun Lee · Young-Ho Ju)

Abstract - Insulation tests have been performed on two generator stator bars under accelerated aging under a laboratory environment. Electrical stress was applied to stator bar No. 1, and electrical and thermal stresses were applied to stator bar No. 2. Nondestructive stator insulation tests including the ac current, dissipation factor($\tan\delta$), and partial discharge tests have been performed on both bars as the bars were aged for 11460 hours. Experimental test results show that ΔI , $\Delta \tan\delta$, and partial discharge of No. 1 and No. 2 stator bars increased with increased in aging time. It has been concluded from the test that the stator insulation of the two generators are in good condition.

Key Words : Accelerated aging, Generator, Stator bar, Aging time, Dissipation factor, Partial discharge

1. 서 론

발전기 고정자 권선은 장기간 운전하는 동안에 열적, 전기적, 기계적 및 환경적 영향으로 인해 절연재료 내부에 보이드(void)가 발생하여 열화가 진행하다가 최종적으로 절연 파괴에 도달한다[1, 2]. 운전중인(on-line) 발전기 고정자 권선의 갑작스런 절연파괴 사고는 전력공급의 신뢰성을 저하시키고 단시간에 복구가 곤란하기 때문에 상대적으로 경제적인 손실이 매우 크게 된다. 따라서 미국, 캐나다 및 일본 등에서 발전기 고정자 권선의 절연열화 특성을 분석하기 위해 열적, 전기적 및 기계적 가속열화를 수행하여 건전성 진단과 수명평가에 활용하고 있다[3~5].

또한, 정지중인(off-line) 발전기 고정자 권선의 절연열화 상태를 평가하기 위해 절연진단 시험을 수행하고 있다. 절연진단 시험항목은 절연저항, 성극지수, 교류전류, 유전정접 및 부분방전 측정 등을 포함하며, 측정데이터를 종합적으로 분석하여 절연열화 여부를 평가하고 있다. 국내에서는 발전기 고정자 권선의 절연열화 상태를 주기적으로 평가하기 위해 절연진단 시험을 수행하고 있으며, 일본전기학회에서 정립한 판정기준을 활용하고 있다[6].

본 연구에서는 발전기 고정자 바(500MW, 22kV)를 실험실에서 열적 및 전기적으로 가속열화를 시키면서 열화시간 증가에 따라 절연진단 시험을 수행하였다. 발전기 고정자 바와 장기간 운전된 발전기(137.5MW, 13.8kV) 고정자 권선에서 교류전류, 유전정접 및 부분방전 크기 등을 측정하여 절

연열화 상태를 평가하였다. 또한, 대용량 발전기(500MW, 22kV) 고정자 권선에서 운전연수에 따라 상전압인 12.7kV 까지 증가하면서 유전정접을 측정하여 가속열화된 발전기 고정자 바와 비교하였다.

2. 발전기 고정자 바 제작 및 가속열화 시험장치

발전기 고정자 권선의 절연열화 상태를 평가하기 위해 실험실적 가속열화 시험에 사용할 목적으로 고정자 바(500MW, 22kV)를 제작하였다. 절연등급이 B종이며, 직접 액체냉각(direct liquid cooled) 방식 이고 소선절연과 주절연 등으로 구성되어 있다. 소선절연은 동도체를 감싸고 있으며, 글라스 섬유(glass fiber)와 합성 에나멜(synthetic enamel) 등이 사용된다. 주절연은 소선절연 전체를 감싸고 있으며, 에폭시/마이카(epoxy/mica) 절연재료를 주로 사용한다. 그림 1은 발전기 고정자 바의 가속열화 시험 사진을 나타내었다. 발전기 고정자 바에 사용된 소선의 단면은 4.27×7.14 mm이고, 배열된 고정자 바 도체부의 단면은 30.7×54.1 mm이다. 직선부의 길이는 6750 mm이며, 양쪽 단말권선은 각각 1080 mm와 1230 mm 이다.

발전기 고정자 바의 가속열화를 위해 전기적 및 열적 열화 시험장치로 구성되어 있다. 고정자 바 No. 1과 No. 2의 전기적 열화는 기본적으로 발전기 운전전압인 상전압(12.7kV)의 2.17배이며, 정격전압(22kV)의 1.25배인 27.5kV 까지 과전압을 인가하였다. 그림 1에서 No. 1의 열적 열화 시험장치는 고정자 바에 흘러주는 냉각수 온도를 65℃로 가열하여 순환시켰다. No. 2는 고정자 바의 냉각수 온도를 65℃로 가열하고 4곳에 히터를 설치하여 150℃가 유지되도록 시험장치를 제작하였다. 따라서 발전기 고정자 바 No. 2는 전기적 및 열적 열화를 동시에 제공하면서 가속열화를 수행하였다. 그림 1을 바라볼 때 왼쪽은 No. 1이며, 오른쪽은 No. 2를 나타내고 있다.

[†] 교신저자, 정회원 : 한전 전력연구원 책임연구원 · 공박
E-mail : hdkim@kepeco.co.kr

* 정 회 원 : 한전 전력연구원 선임연구원

** 정 회 원 : 한전 전력연구원 수석연구원

접수일자 : 2009년 5월 19일

최종완료 : 2009년 5월 28일

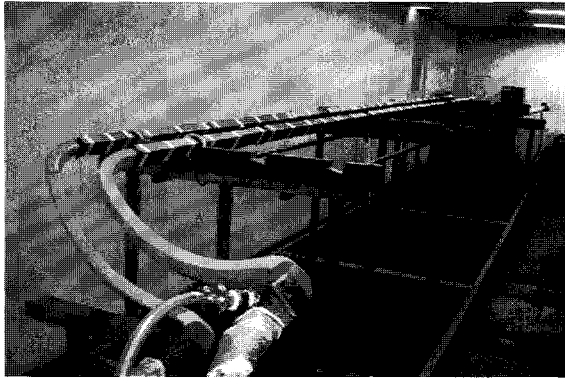


그림 1 발전기 고정자 바 No. 1과 No. 2의 가속열화 시험
 Fig. 1 Accelerated aging tests of generator stator bars No. 1 and No. 2

3. 시험방법

본 논문은 가속열화된 발전기 고정자 바(500MW, 22kV)와 장기간 사용된 2대의 발전기에서 정지중 절연진단 시험을 수행하였다. 1대는 14년 이상 운전된 수냉각 발전기(500MW, 22kV)이며, 그림 1에 나타난 발전기 고정자 바와 동일한 권선을 사용하고 있다. 다른 1대는 38년 이상 운전된 수소냉각 발전기(137.5MW, 13.8kV)를 사용하였다. 가속열화된 발전기 고정자 바와 2대의 발전기 고정자 권선에서 교류전류, 유전정접 및 부분방전 시험을 위해 교류 전원장치와 제어 시스템(HV supply and control system), 셰링브리지(Schering bridge), 공진 인덕터(resonating inductor), 커플링 캐패시터(coupling capacitor), 커플링 유니트(coupling unit) 및 부분방전 측정기(partial discharge detector)를 사용하였다. 교류전류와 유전정접 시험은 교류 전원장치와 제어 시스템(Tettex Instruments, Type 5284), 셰링브리지(Tettex Instruments, Type 2816) 및 공진 인덕터(Tettex Instruments, Type 5288)를 사용하였다. 부분방전 시험은 발전기 고정자 권선에 교류 전원장치와 제어시스템을 연결하여 전압을 인가하였으며, 커플링 캐패시터(Tettex Instruments, 4,000pF)는 권선에서 유입되는 신호를 커플링 유니트(Tettex Instruments, AKV 572)에 보내어 증폭한 후 부분방전 측정기(Tettex Instruments, TE 571)에서 방전크기 및 패턴을 분석하였다. 부분방전 측정기의 주파수 대역폭은 40~400kHz 이다. 발전기 고정자 바의 부분방전 크기가 상전압(12.7kV)에서 1600~17000 pC을 나타내기 때문에 일반 시험실에서 측정하였으며, 외부잡음은 300~400 pC 정도를 나타내고 있다. 따라서 실험실에서 측정된 부분방전 크기는 외부잡음이 포함되어 있다.

4. 시험결과 및 고찰

발전기 고정자 바 No. 1은 가속열화 시험 전에 냉각수 온도를 65℃로 가열하면서 장시간 동안 흡습시험에 사용되었으며, No. 2는 신규 고정자 바이다. 그림 2와 그림 3은 발전기 고정자 바 No. 1과 No. 2에서 가속열화 시간이 증가함에

따라 tanδ-전압 특성을 나타내었다. 그림 2는 가속열화 시간이 증가함에 따라 유전정접의 변화는 크게 나타났으며, 초기 데이터에 비해 4780[h] 동안 가속열화가 진행된 후에 약 2배 정도로 증가하였다. 또한, 유전정접의 증가점도 0[h]와 2070[h]에서 각각 8kV, 4780[h]에서 7kV, 8960[h]에서 6kV 및 10620[h]에서 5kV 정도로 점점 낮게 측정되었다. 따라서 가속열화 시간이 증가함에 따라 고정자 바 주절연재료의 열화로 인해 보이드가 생성됨에 따라 유전정접의 크기도 지속적으로 증가하고 있으며, 유전정접의 증가점도 낮은 전압으로 이동하고 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 열적 사이클(thermal cycle)의 증가에 따라 측정된 유전정접의 데이터와 유사하게 분석되었다[7].

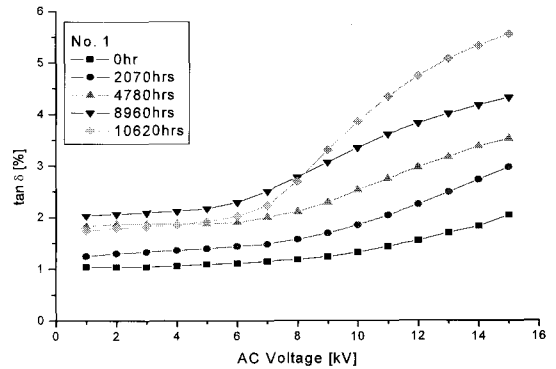


그림 2 발전기 고정자 바 No. 1과 No. 2의 가속열화 시험
 Fig. 2 Characteristics of tanδ-voltage in No. 1 stator bar

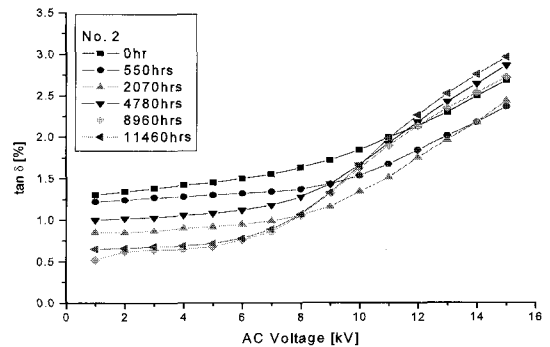


그림 3 고정자 바 No. 2의 tanδ-전압 특성
 Fig. 3 Characteristics of tanδ-voltage in No. 2 stator bar

그림 3은 고정자 바 No. 2에서 가속열화 시간이 증가함에 따라 유전정접의 변화를 나타내었다. 고정자 바 No. 1에서 언급한 바와 같이 유전정접의 증가점도 0[h]와 550[h]에서는 8kV, 2070[h]와 4780[h]에서는 6kV, 8960[h]와 11460[h]에서는 5kV 정도로 낮게 측정되었다. 절연열화로 인해 유전정접이 급격하게 변화하는 전압이 점차적으로 낮아지고 있다. 따라서 가속열화 시간이 증가함에 따라 고정자 바의 절연열화가 진행되고 있음을 확인할 수 있었다. 유전정접이 0[h]에 비해 550[h]와 2070[h]에서 측정된 데이터가 오히려 감소하는 특성을 나타내었다. 이러한 이유는 전압 스트레스(stress)

와 열적 스트레스에 의해 절연재료가 초기 운전상태에서 경화됨에 따라 에폭시 리치(rich) 영역에서 미세 보이드의 감소와 연관성이 있다. 또한, 고정자 바 외부에서 150°C로 가열되고 동도체 냉각 흡을 따라 흐르는 65°C의 냉각수 온도에 의한 열적 안정성으로 인해 주절연재료의 에폭시 수지 매트릭스(resin matrix)에서 가교(cross-linking) 반응이 발생되어 보이드 수가 감소함에 따라 유전정접이 감소하고 있다[8, 9].

또한, 에폭시 수지와 화합물이 혼합됨에 따라 절연재료 내부의 반응은 분자의 중합과 횡단결합(transverse bond)을 발생시키며, 절연재료 내부의 가교반응이 고체를 형성하게 만든다. 따라서 가속열화 시간이 증가함에 따라 11kV 정도에서 유전정접이 급격하게 증가하고 초기 데이터보다 훨씬 증가하는 패턴을 나타내고 있다. 이러한 현상은 열적 사이클링(thermal cycling)의 결과와 유사하며, 열적 사이클링 동안에 발생하는 주요한 스트레스 중에 하나가 동도체와 주절연재료 사이에서 전단응력(shear stress)이다. 전단응력은 궁극적으로 계면에서 결합력을 약화시켜 보이드의 수가 증가함에 따라 $\Delta \tan\delta$ 을 증가시킨다[7].

표 1은 그림 2와 그림 3을 근거로 가속열화 시간이 증가함에 따라 유전정접의 변화율($\Delta \tan\delta$)을 측정하고 교류전류-전압 특성에서 교류전류 증가율(ΔI)을 분석하였다. 가속열화 시간이 증가함에 따라 고정자 바 No. 2 보다는 고정자 바 No. 1에서 ΔI , $\Delta \tan\delta$ 및 부분방전 크기 등이 현저하게 증가하고 있다. 이러한 차이는 앞에서 설명한 바와 같이 고정자 바 No. 1은 장시간 동안 흡습시험에 사용됨에 따라 초기상태가 신규 권선인 고정자 바 No. 2와 근본적으로 다를 뿐만 아니라 가속열화 조건이 서로 다르기 때문이다. 그리고 고정자 바 No. 2는 초기 데이터에 비해 가속열화 시간이 550[h] 경과 후에 ΔI , $\Delta \tan\delta$ 및 부분방전 크기 등이 오히려 감소하고 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 발전기 고정자 바의 절연재료가 초기 운전상태에서 동도체의 줄열에 의해 경화됨에 따라 보이드 수의 감소와 직접적인 연관성이 있다.

표 1 고정자 바 No. 1과 No. 2에서 절연진단 결과 비교
Table 1 Comparison of insulation diagnosis results in No. 1 and No. 2 stator bars

가속 열화 시간[h]	ΔI [%]		$\Delta \tan\delta$ [%]		부분방전 크기[pC] at 12.7kV		가속 열화 시간[h]
	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2	
0	1.33	2.53	1.02	1.34	3200	4100	0
550	2.45	1.90	1.46	1.12	2700	1600	550
2070	3.05	2.33	1.67	1.58	3800	3100	2070
4780	3.76	2.64	1.65	1.84	7800	5700	4780
8960	4.73	3.49	2.25	2.10	10600	7000	8960
10620	6.66	3.75	3.76	2.30	17000	7300	11460

그림 4는 대용량 발전기(500MW, 22kV) 고정자 권선에서 외부인가전압을 상전압인 12.7kV까지 증가하면서 $\tan\delta$ -전압

특성을 나타내었다. 1996년 10월에 신규 발전기를 설치한 후에 최초로 측정하였으며, 1999년 2월은 동일한 발전기에서 29개월 동안 운전후에 측정하였다. 그리고 2005년 10월은 동일한 발전기에서 9년 정도 운전후에 다시 측정하였다. 그림 3에서 나타낸 바와 같이 초기에 측정한 유전정접에 비해 29개월 정도 운전후에 측정한 유전정접이 더 낮게 측정되었고, 9년 후에는 최저점을 유지하다가 절연열화가 진행되면 다시 유전정접이 증가할 것이다. 이러한 현상은 발전기 고정자 권선의 주절연재료 두께가 5.5mm이며, 마이카 테이프(tape)를 사용하는 주절연물 내부에서 에폭시가 경화되지 않아서 미세한 보이드를 많이 갖고 있기 때문이다. 따라서 29개월 동안 운전하게 되면 권선 내부에서 발생하는 줄열에 의해 에폭시가 경화됨에 따라 미세한 보이드가 제거되어 $\tan\delta$ 가 감소하게 된다[7~9].

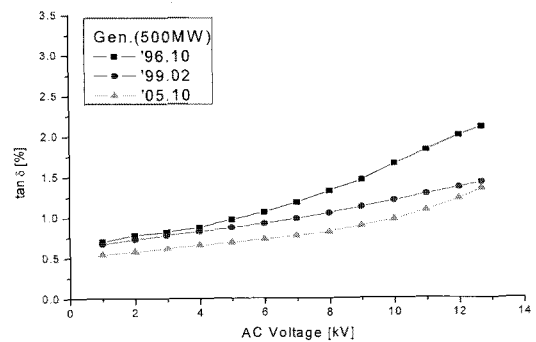


그림 4 발전기(500MW)의 $\tan\delta$ -전압 특성
Fig. 4 Characteristics of $\tan\delta$ -voltage in generator(500MW)

그림 5, 그림 6 및 그림 7은 화력발전소 발전기(137.5MW, 13.8kV) 고정자 권선에서 외부인가전압을 12kV까지 인가하면서 $\tan\delta$ -전압 특성과 교류전류-전압 특성을 나타내었다. 이 발전기는 38년 동안 운전되었으며, 그림 5에 나타낸 바와 같이 유전정접이 4kV에서 서서히 증가하다가 5kV에서 급격하게 증가하고 있다. 발전기 A, B, C상의 $\tan\delta$ 가 12kV에서 5.38%를 나타내고 있다. 이러한 유전정접 특성은 그림 2에서 나타낸 바와 같이 가속열화가 10620[h] 동안 진행된 데이터 패턴과 거의 일치하고 있다.

그림 6은 2000년 9월과 2009년 4월에 측정된 $\tan\delta$ -전압 특성을 나타내었으며, 두개의 데이터를 비교한 결과 9년 정도 운전후에 측정한 유전정접이 훨씬 크게 증가하였다. 또한, 유전정접의 증가점도 2000년 9월에는 6kV로 나타났으나 2009년 4월에는 4kV 정도로 낮게 측정되었다. 따라서 발전기 고정자 권선이 장기간 운전됨에 따라 절연열화가 크게 진행되고 있음을 확인할 수 있었다. 유전정접이 4kV에서 서서히 증가하다가 5kV에서 급격하게 증가하고 있기 때문에 부분방전 개시전압(partial discharge inception voltage : PDIV)도 4kV~5kV에서 발생됨을 예측할 수 있다. 부분방전 개시전압은 발전기 고정자 권선에 교류전압을 증가하면서 측정한 부분방전 크기가 1000 pC이상이므로 나타날 때 전압을 의미한다. 표 2에 나타낸 바와 같이 발전기 A, B, C상에서 부분방전 개시전압이 각각 4.8kV, 4.3kV, 4.3kV에서 발생되었다.

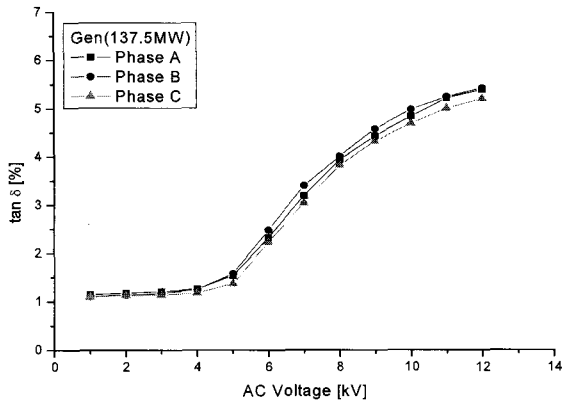


그림 5 발전기(137.5MW)의 tanδ-전압 특성
Fig. 5 Characteristics of tanδ-voltage in generator(137.5MW)

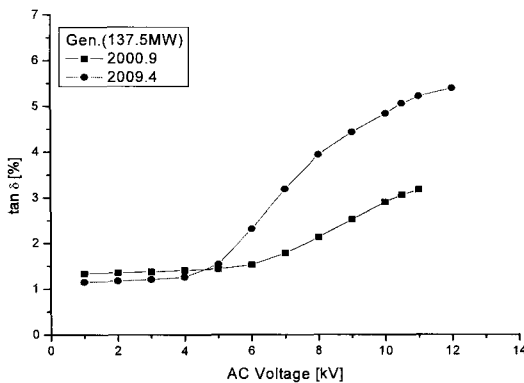


그림 6 tanδ-전압 특성의 비교
Fig. 6 Comparison of tanδ-voltage characteristics

표 2 발전기 고정자 권선의 부분방전 특성
Table 2 Characteristics of partial discharge in generator stator windings

발전기 (137.5MW, 13.8kV)	부분방전 크기[pC]				
	계통잡음 [pC]	방전개시 전압[kV]	$E/\sqrt{3}$ [pC]	$1.25E$ / [pC]	
2000.9	A상	300	6.5	2,200	4,000
	B상	220	6.3	1,500	2,000
	C상	280	6.7	1,500	1,800
2009.4	A상	130	4.8	3,700	4,300
	B상	150	4.3	7,300	7,800
	C상	120	4.3	3,700	4,300

표 2는 2000년 9월과 2009년 4월에 측정된 부분방전 특성을 비교하였다. 2000년 9월에 측정된 발전기 A, B, C상에서 부분방전 개시전압이 각각 6.5kV, 6.3kV, 6.7kV이며, 2009년 4월에는 각각 4.8kV, 4.3kV, 4.3kV로 현저하게 감소하였다. 부분방전 개시전압은 그림 5에 나타난 바와 같이 유전정접의 증가점과 거의 일치하게 분석되었다. 그리고 부분방전 크기도 인가전압을 상전압에서 상전압의 1.25배로 증가함에 따

라 약간 증가하였다.

그림 7은 발전기(137.5MW, 13.8kV) 고정자 권선의 교류전류-전압 특성을 나타내었으며, 교류전류의 제1급중점도 A, B, C상에서 평균적으로 4.5kV를 나타내고 있다. 다시 말하면 tanδ-전압 특성에서 유전정접이 급격하게 증가하는 전압이 부분방전 개시전압과 거의 일치하게 된다. 이 전압은 다시 교류전류-전압 특성에서 교류전류의 제1급중점과도 일치하게 된다. 따라서 발전기 고정자 권선이 절연열화됨에 따라 유전정접의 증가점, 교류전류의 제1급중점 및 부분방전 개시전압 등이 모두 낮은 전압으로 이동하는 것을 확인할 수 있었다.

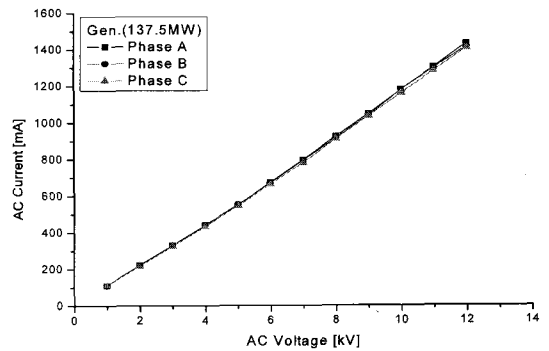


그림 7 발전기(137.5MW)의 교류전류-전압 특성
Fig. 7 Characteristics of AC current-voltage in generator

표 3은 2000년 9월과 2009년 4월에 측정된 발전기 고정자 권선의 절연진단 결과를 비교하였다. ΔI와 Δtanδ는 2000년 9월에 비해 현저하게 증가하였으며, 각 상별로 측정된 부분방전 크기도 약간씩 증가하였다. 따라서 현재 발전기 고정자 권선의 절연상태는 ΔI, Δtanδ 및 부분방전 크기가 기준값의 범위 이내에 있기 때문에 양호하게 평가되었으나, 2000년 9월에 비해 절연열화가 크게 증가하고 있음을 확인할 수 있었다.

표 3 발전기 고정자 권선에서 절연진단 결과
Table 3 Results of insulation diagnosis in generator stator windings

시험항목	ΔI[%]	Δtanδ[%]	부분방전 크기[pC] at 8kV
양호 판정기준	12.0미만	6.5미만	10,000미만
2000.9	A상	2.48	2,200
	B상	2.18	1,500
	C상	2.26	1,500
2009.4	A상	9.06	3,700
	B상	8.16	7,300
	C상	8.10	3,700

5. 결 론

발전기 고정자 바 No. 1과 No. 2에서 가속열화 시간이 증가함에 따라 ΔI , $\Delta \tan \delta$ 및 부분방전 크기 등이 서서히 증가하고 있으며, 절연열화가 진행함에 따라 유전정접의 증가점이 낮은 전압으로 이동하고 있음을 확인할 수 있었다. 신규 고정자 바 No. 2와 운전중인 발전기(500MW, 22kV) 고정자 권선에서 가속열화 시간과 운전연수가 증가함에 따라 유전정접이 초기 측정 데이터 보다 낮게 나타나는 것은 초기 운전동안 동도체 내부에서 발생하는 줄열에 의해 에폭시 리치 영역이 경화되어 미세한 보이드가 감소한 것으로 판명되었다. 발전기(137.5MW, 13.8kV) 고정자 권선에서 절연열화가 지속적으로 진행됨에 따라 유전정접의 증가점, 교류전류의 제1급중점 및 부분방전 개시전압 등이 모두 낮은 전압으로 이동하였다. 발전기 고정자 권선이 38년 동안 운전되어 절연열화가 현저하게 진행하고 있으나, 절연상태를 종합적으로 분석한 결과 양호하여 운전에 문제가 없는 것으로 평가되었다.

참 고 문 헌

- [1] 김희동, "발전기 고정자 권선의 절연열화 메카니즘 분석", 전기전자재료학회논문지, Vol. 15, No. 2, pp. 119~126, 2002.
- [2] 김희동, "운전중인 대형 터빈발전기에서 절연상태 평가", 전기학회논문지, Vol. 53C, No. 6, pp. 324~329, 2004.
- [3] R. Morin, R. Bartnikas and P. Menard, "A Three-Phase Multi-Stress Accelerated Electrical Aging Test Facility for Stator Bars", IEEE Trans. on Electrical Conversion, Vol. 15, No. 2, pp. 149~156, 2000.
- [4] Y. J. Kim and J. K. Nelson, "Assessment of Deterioration in Epoxy/Mica Machine Insulation" IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 27, No. 5, pp. 1026~1039, 1992.
- [5] K. Kimura and Y. Kaneda, "The Role of Microscopic Defects in Multistress Aging of Micaceous Insulation", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 3, pp. 426~432, 1995.
- [6] H. Yoshida and K. Umemoto, "Insulation Diagnosis for Rotating Machine Insulation", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. EI-21, No. 6, pp. 1021~1025, 1986.
- [7] H. Zhu, C. Morton and S. Cherukupalli, "Quality Evaluation of Stator Coils and Bars under Thermal Cycling Stress", Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp. 384~387, 2006.
- [8] M. Farahani, H. Borsi, E. Gockenbach and M. Kaufhold, "Partial Discharge and Dielectric Response Behaviour of Insulation Systems for High Voltage Rotating Machines under Electrical Stress" IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 271~274, 2004.
- [9] Hee Dong Kim, "Electrical and Chemical Properties of Mica/Epoxy Composite Materials as Affected by Short-Time Aging", KIEE Trans. on Electrophysics and Applications, Vol. 3-C, No. 2, pp. 59~65, 2003.

저 자 소 개



김희동 (金熙東)

1961년 12월 15일생. 1985년 홍익대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 2002년 일본 큐슈공업대학교 초빙연구원. 현재 한전 전력연구원 책임연구원

Tel : 042-865-7571

Fax : 042-865-7599

E-mail : hdkim@kepco.co.kr



이영준 (李泳俊)

1963년 2월 8일생. 1985년 홍익대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한전 전력연구원 선임연구원

Tel : 042-865-7572

Fax : 042-865-7599

E-mail : leeyj@kepri.re.kr



주영호 (朱榮鎭)

1956년 5월 1일생. 1981년 인하대 전기공학과 졸업. 2000년 한밭대 대학원 전기공학과 졸업(석사).

현재 한전 전력연구원 수석연구원

Tel : 042-865-7570

Fax : 042-865-7599

E-mail : juyh@kepri.re.kr