

碩士學位論文

同期發電機 壽命診斷을 爲한
評價方法의 研究

指導教授 吳 性 寶



濟州大學校 産業大學院

電子電氣工學科

黃 忠 九

2000

同期發電機 壽命診斷을 爲한
評價方法의 研究

指導教授 吳 性 寶

이 論文을 工學碩士學位 論文으로 提出함.

2000年 6月 日

濟州大學校 産業大學院

電子電氣工學科(電氣工學)



黃 忠 九

黃忠九의 工學碩士學位 論文을 認准함.

2000年 6月 日

委員長 이 거명



委員 左宗根



委員 吳性寶



목 차

LIST OF FIGURES	ii
LIST OF TABLES	iii
SUMMARY	iv
I. 서 론	1
II. 진단시험	2
1. 고정자 철심 건전성 시험	2
2. 고정자 웨지 조임성검사	4
3. 직류전류 시험	5
4. 부분방전 시험	6
5. 교류전류 시험	9
6. 유전역률 시험	11
7. 단부 권선 진동성 검사	12
III. 시험결과 및 고찰	13
1. 고정자 철심 건전성 시험	14
2. 고정자 웨지 조임성검사	16
3. 직류전류 시험	18
4. 부분방전 시험	21
5. 교류전류 시험	23
6. 유전역률 시험	26
7. 단부 권선 진동성 검사	29
1) Exciter 측 3- 9시 방향	29
2) Exciter 측 6-12시 방향	32
3) Turbine측 3- 9시 방향	35
4) Turbine측 6-12시 방향	38
IV. 결 론	41
참 고 문 헌	42

LIST OF FIGURES

Fig. 1 EL-CID test at stator core	3
Fig. 2 P.I test circuit	5
Fig. 3 Test circuit for partial discharge	7
Fig. 4 The trends of partial discharge	8
Fig. 5 AC current test circuit	10
Fig. 6 AC voltage and current curves	10
Fig. 7 Circuit for $\tan\delta$ test	11
Fig. 8 EL-CID test results at stator core	16
Fig. 9 DC current of P.I test at stator	19
Fig.10 DC current of P.I test at rotor	20
Fig.11 Test results of partial discharge	22
Fig.12 Test results of AC current at R-phase	23
Fig.13 Test results of AC current at S-Phase	24
Fig.14 Test results of AC current at T-phase	25
Fig.15 Test results of $\tan\delta$ at R-phase	26
Fig.16 Test results of $\tan\delta$ at S-phase	27
Fig.17 Test results of $\tan\delta$ at T-phase	28
Fig.18 Test results of end baskets at 3-9 clock directions	31
Fig.19 Test results of end baskets at 6-12 clock directions	34
Fig.20 Test results of end baskets at 3-9 clock directions	37
Fig.21 Test results of end baskets at 6-12 clock directions	40

LIST OF TABLES

Table 1	Specification of synchronous generator	13
Table 2	Results of strike sound measurement	17
Table 3	Results of P.I test at stator	18
Table 4	Results of P.I test at rotor	18
Table 5	Results of partial discharge	21
Table 6	Test results of AC current at R-phase	23
Table 7	Test results of AC current at S-phase	24
Table 8	Test results of AC current at T-phase	25
Table 9	Test results of $\tan\delta$ at R-phase	26
Table 10	Test results of $\tan\delta$ at S-phase	27
Table 11	Test results of $\tan\delta$ at T-phase	28

A Study on the Evaluation Method and Measure Test for Life Diagnosis in Synchronous Generator

Choong-Goo Hwang

DEPARTMENT OF ELECTRONIC AND ELECTRICAL
ENGINEERING GRADUATE SCHOOL OF INDUSTRY
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

Supervised by professor Seong-bo Oh



The generator falls its performance, confidence and life owing to complex causes that are mechanical, electrical, heatful, surrounding factors and start-stop impulse in 20 years or 100,000 hours. Especially, slot discharge in stator, end winding discharge, DSS and WSS have a direct effect on the life of generator. Faults of generator suddenly occur, are dangerous and expensive as well as difficult to recover.

In this paper, We studied about experiments on EL-CID, wedge compressed state check, PI test, PD test, ac current test, $\tan \delta$ test and end baskets test in BUKCHEJU thermal power plant No.1 generator which have used for 17 years.

Resultantly, We offer the effective life management through methods of evaluation and measure for life diagnosis.

I. 서 론

발전기는 20년 내지 10만 시간이 경과되면서 기계적, 전기적, 열적, 환경적 요인과 기동, 정지 스트레스 등 복합적인 요소에 의해 성능과 신뢰성이 저하되고 수명 소비율이 증가된다. 특히 고정자의 슬롯방전과 권선 단말방전, 회전자 접지 및 일일기동정지(daily start and stop : DSS), 주말기동정지(weekly start and stop : WSS)는 발전기 수명에 직접적인 영향을 미치고 있다. 우리 나라의 경우 발전소 고장정지중 전기설비에 의한 고장정지가 36%로 가장 큰 비중을 나타내고 있으며 일본의 경우 수력 동기 발전기 사고 중 고정자 권선 50%, 여자기 15%, 베어링 13.5%, 회전자 7%, 기타 11% 등으로 조사되고 있으며, 고정자 권선의 사고 원인은 절연열화가 44.9%로 높게 나타나고 있다. 네덜란드에서는 1982년부터 1997년까지 15년 동안 687대의 발전기에서 사고가 발생하였으며 이중 35%가 발전기 운전중 고정자 권선 열화로 인한 사고로 판명되었다. 미국 EPRI에서도 조사한 결과 37%가 고정자 권선에서 절연파괴가 발생하여 발전기 수명에 영향을 끼친 것으로 보고되었다. (발전교육원, 1998)

발전기 고장은 돌발적으로 발생하며 위험이 크고 단시간 내에 복구가 곤란할 뿐만 아니라 상대적으로 복구비용도 많이 든다. 최근에는 선진국에서도 발전기의 고장 예방 및 수명진단을 위하여 성극지수, 교류전류, 유전정접 및 부분방전 등 비파괴 시험을 통하여 신뢰성을 향상시키고, 수명을 연장시키기 위한 연구와 관심이 대단히 높아지고 있다. (김희동, 1998) 그리고 발전기 절연 열화 판정기준에 관한 연구는 일본과 북미 중심으로 이루어져 왔으나 최근에는 국내에서도 활발히 진행중이다. (池田易行 외 1, 1989)

본 연구에서는 17년 동안 운전한 복제주화력 1호기 발전기의 수명진단을 위해 코어 건전성 측정을 위한 EL-CID시험, 웨지 조임 상태를 점검하기 위한 타음과 떨림의 감지시험, 직류전류에 의한 절연물의 흡습과 오손을 판정하는 PI 시험, 교류전류에 의한 누설전류의 증가율(ΔI %) 시험, 절연물의 유전체손실을 측정하는 유전역률 시험 ($\tan \delta$), 절연층의 미소공극, 균열, 박리의 결함부에서 발생하는 방전전류를 측정하는 부분방전시험 및 발전기 단부 권선의 진동성 검사 등 발전기 수명진단을 위한 측정방법과 평가방법을 연구함으로써 보다 효율적인 수명관리를 제안하고자 한다.

II. 진단 시험

북제주화력 기력 1호기 발전기에 적용한 진단방법은 아래와 같으며 이 방법들은 고정자 권선 절연, 철심, 웨지, 권선단말 및 회전자 권선에 적용하여 시험하였다.

1. 고정자 철심 건전성 시험 (EL-CID)

수 천장의 철심을 원주상으로 적층하고 절연처리한 발전기 고정자는 물리적, 전기적 원인으로 인해 와전류가 흐르게되며 이때 발생하는 열로 인해 철심을 용융시키기도 하고 고정자 권선의 절연을 파괴시키는 사고에 이르게 되기도 한다.

과거에는 철심의 상태를 검사하기 위해서 루우프 시험을 실시하였으나 이 방법은 철심손상에 의한 과열부위의 열을 감지하기 위해 발전기의 정격자속 수준까지 여자시켜야 했다. 그러나 이 방법은 시험을 수행하기 어려울 뿐만 아니라 슬롯 내부의 손상점을 표출하기 위해 오랜 시간 코어를 여자시키므로 손상부위가 악화되는 문제를 안고 있다. 이러한 루우프시험의 난점을 해결하기 위한 EL-CID (electromagnetic core imperfection detector) 방법은 루우프 시험에서의 단점들을 보완하고 내부 손상을 감지해내기 위한 방법으로 국내업체에서도 최근 이 기술을 도입하여 발전기 제작시 부터 이용하고 있다.

EL-CID 시험은 코어내 원주자속을 발생시키기 위해 여자권선을 이용한다. 그러나 이 여자권선은 정격자속의 4%의 자속을 발생시키며 이 자속에 의해 발생하는 코어 표면 양단의 자위차 (magnetic potential difference : MPD)를 탐지코일을 이용하여 철심 손상위치를 찾아내는 방법으로써 Fig. 1 과 같으며 매우작은 철심손상에 대해서도 감도 높게 측정하기위해 100[mA]를 MPD 기준으로 정하였고, 발전기 여자전압 계산으로는 ADWEL 방식을 적용하였으며 식(1)과 같다. (발전교육원, 1998)

$$V_T = \frac{V_{PP}}{2\sqrt{3} \times K \times t_p} \times 0.04 \quad (1)$$

여기서

- V_{PP} 정격 선간전압
- t_p 한 상당 직렬권수(즉 상당 도체수는 $2t_p$)
- K : 분포, 단절계수 (약 0.92)
- V_T 4% 시험 여자전압 이며

이를 북제주화력 1호기 발전기에 적용하면 단자전압 6.6 KV, 슬롯 66, 그러므로 1상당슬롯은 $66/3=22$ 개 이며, 1상당 직렬권수는 $t_p=11$ 이므로 4% 시험 여자전압은 다음과 같다.

$$V_T = \frac{6600}{2\sqrt{3} \times 0.92 \times 11} \times 0.04 = 7.5 [V]$$

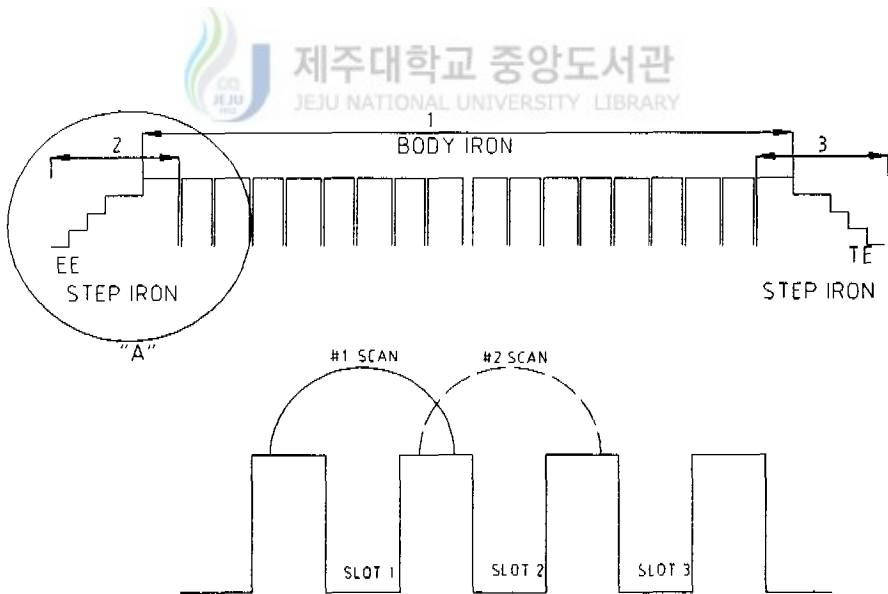


Fig. 1 EL-CID test at stator core

2. 고정자 웨지 조임성 검사

고정자 웨지는 숙련된 전문가의 타력 강도와 청각에 의한 주관적인 판단이 되어 왔으나, 본 시험에서는 보다 진보된 방법으로 로봇트에 의해 일정크기의 힘으로 타력을 가하고 이의 압력반응을 기계적 장치에 의해 객관적으로 실시하였으며, 동일 웨지에 3회씩 시험을 실시하였다. 조임성은 시험은 전체 66슬롯의 330개 웨지에 대하여 시행하였으며 조임 정도에 따라 매우 헐거움(very loose), 헐거움(loose or hollow), 단단(tight), 매우 단단(very tight)으로 구분하였다

1) 타음 측정내용 및 기준

매우헐거움은 작은 해머나 드리프트를 이용하여 웨지를 때리면 방울소리가 나며 웨지 양측면에서 먼지가 날정도, 혹은 웨지가 상당히 밀려 코어 표면과 제 위치가 일치하지 않고 웨지 접측면에 드라이버를 삽입하여 밀면 쉽게 움직임, 또는 웨지가 슬롯 밖으로 밀려있고 슬롯 가장끝 웨지 밑의 필러가 0.060인치 이상 밀려있는 정도이며, 헐거움은 웨지를 때리면 먼지의 발생이나 축방향의 움직임을 없지만 쉽게 진동을 감지할 수 있고 저주파 특성을 가진 저음의 빈소리가 나고 슬롯 양 끝단 웨지 하부 필러가 약간 움직인 흔적이 있으며 0.060인치 이하이다. 단단함은 웨지가 높은 음의 단단한 소리를 내며 매우작은 진동이 감지되고 축방향 움직임을 보이지 않으며 단부 웨지 하부 필러의 움직임을 보이지 않는다. 매우단단은 단단한 현상과 같으나 강철을 때리는 정도의 고음을 들을 수 있다. (발전교육원, 1998)

2) 재웨이징 판정기준

한 개의 슬롯내의 50[%] 이상의 웨지가 헐거움 웨지이면 그 슬롯 전체를 재웨이징 하여야 하며, 한 슬롯내에 연속 15[%] 또는 불연속 30[%] 헐거움 웨지가 존재시 그 슬롯에서 터빈 또는 여자기의 가까운 쪽에서 재웨이징하며, 각 슬롯의 양단 3개의 웨지가 연속으로 헐거움이 존재시 그부분을 재웨이징한다. 또한 발전기 고정자 길이를 1/3로 나누어 그 부분의 웨지 상태가 헐거움 분량이 50[%]이상 이면 그 1/3부분을 전체 재웨이징한다.

3. 직류 전류 시험 (P.I test)

직류 전류 시험은 Fig. 2의 회로도와 같이 절연물에 직류전압을 인가하여 누설전류-시간의 특성으로부터 절연물의 흡습, 오손, 불순물 혼입 및 결합상태를 판정하는 시험이다. 절연물의 표면이 오손되거나 흡습되면 누설전류가 증가하고 전류-시간의 특성곡선으로부터 감쇄율이 낮아지게 된다. 이 감쇄율을 성극지수(Polarization Index : P.I)로 나타낼수 있으며 식(2)와 같다.

또한 PI시험은 고정자권선을 각 상별로 분리하여 전압을 인가하여 측정하며 PI지수가 1.5보다 클 때는 권선상태가 양호한 것으로 판정한다. (발전교육원, 1998)

$$P.I = \frac{I_1}{I_{10}} \quad (2)$$

여기서

I_1 : 전압인가 1분후 누설전류

I_{10} : 전압인가 10분후 누설전류

발전기 고정자는 DC 1000 [V], 회전자는 DC 500 [V] 를 각각 인가하여 시험하였다.

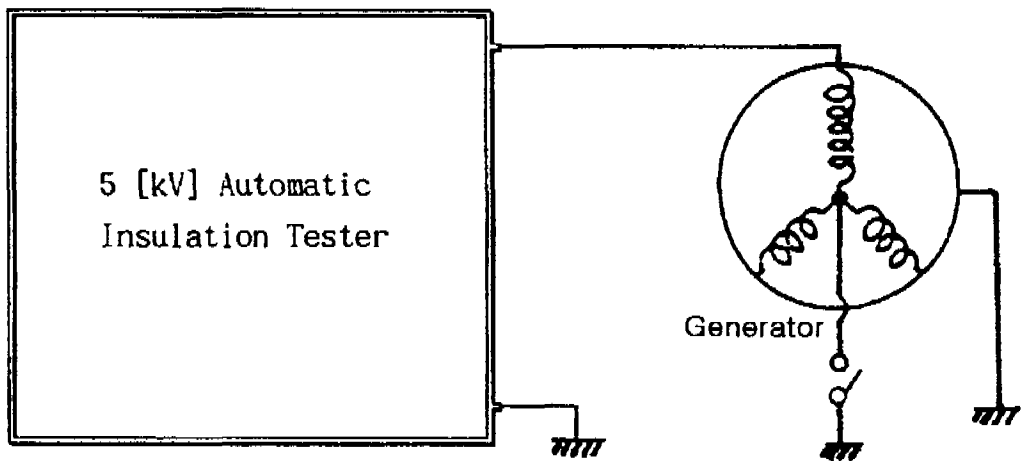


Fig. 2 P.I test circuit

4. 부분방전 시험 (Partial discharge : P.D)

부분방전 시험은, 고정자 절연물의 미소공극, 균열, 박리, 트리와 같은 결함에서 부분방전 전류가 발생한다. 이때 방전 임펄스 전하량의 평균적인 크기를 측정하여 절연재료의 결함, 열화상태 및 건전성을 판단하는 중요한 시험이며 회로도 는 Fig. 3과 같다.

도체표면방전은 주절연과 소선절연 사이의 미소공극에 의해 발생되며, 주절연재료인 바니쉬나 수지의 부적절한 함침과 절연층의 박리에 의해 발생하는 내부방전, 고체 절연체 내부에서 국부적으로 집중된 고전계 또는 보이드방전이 수지상으로 진전한 트리방전, 권선 표면의 코일과 슬롯의 상대적인 움직임에 의해 마모되어 일어나는 슬롯방전, gas와 액체로 채워진 전극의 날카로운 돌출 부분에서 발생하는 코로나 방전 및 주로 15년이상 운전된 발전기의 낮은 전압에서의 도체표면방전과 이상전압에서의 슬롯방전이 함께 존재하는 복합방전이 있다. (D. G. Edwards, 1994)

부분방전 시험은 발전기 수명진단 및 안정적 운전에 크게 기여하며 절연재료의 신뢰성을 평가하는데 매우 중요한 방법이다. 따라서 부분방전 시험은 지속적으로 연구되고 있으며 방전현상의 탐지, 위치 및 평가를 위해 유용한 측정법이 개발되고 있다. (R. E James 외 1, 1995) Fig. 4는 부분방전 현상의 종류를 나타내고 있다.

복제주화력 1호기 발전기는 1000 [pC]에 해당되는 방전개시 전압을 측정하고 정격 상전압의 1.25배를 가하여 방전되는 전하량을 측정하여 절연열화상태를 판정하였다. (황돈하 외 2, 1996)

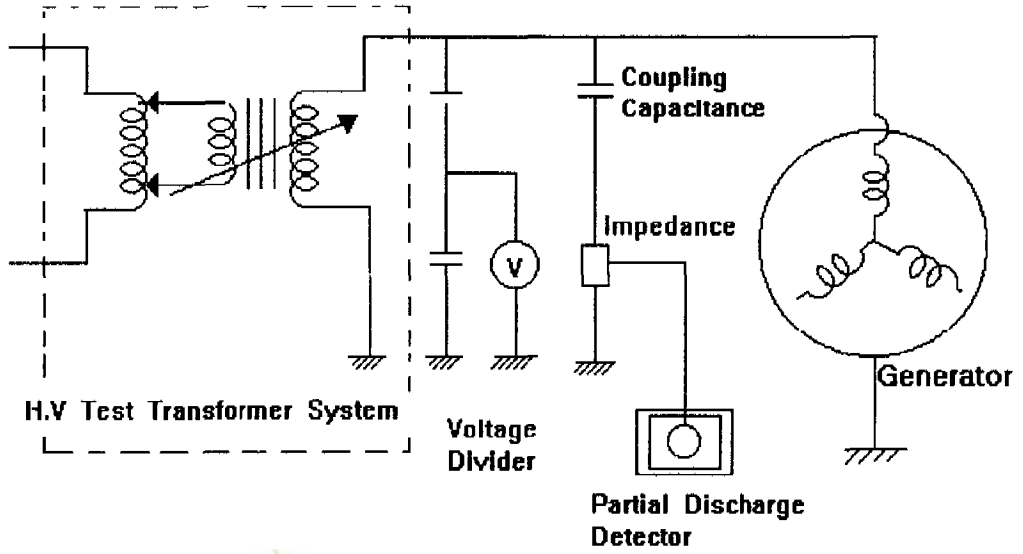
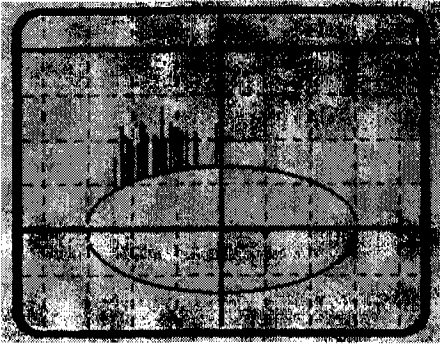
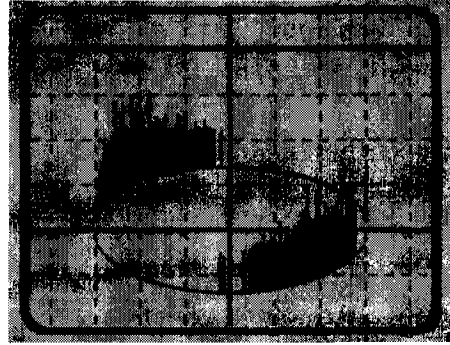


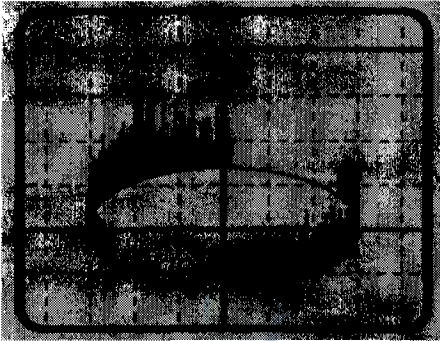
Fig. 3 Test circuit for partial discharge



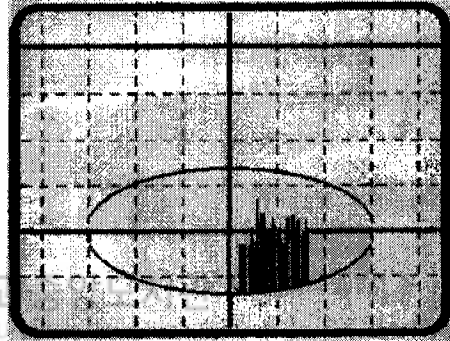
(a) Conductor surface discharge



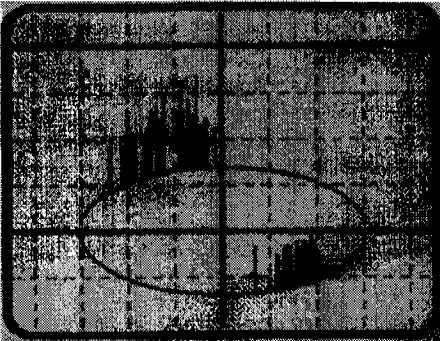
(b) Internal discharge



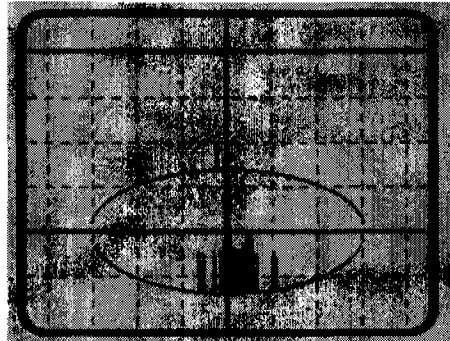
(c) Treeing discharge



(d) Slot discharge



(f) Combined discharge



(e) Corona discharge

Fig. 4 The trends of partial discharge

5. 교류 전류 시험 (AC current test)

교류전압을 Fig. 5와 같이 절연물에 인가하면 전압상승에 비례하여 충전전류가 증가하며, 인가전압이 높아져 부분방전이 발생하면 전류는 전압에 비례하지 않고 Fig. 6과 같이 급증하게 된다. 이와같이 전류가 증가하는 비율을 측정하여 절연물의 열화, 흡습 및 부분방전 상황 등을 진단한다. 전류가 급증하는 점의 전압을 전류급증 전압이라 부르며, 2개의 전류급증점이 존재할 경우 낮은 전압점을 제1전류 급증점(P_{11}), 높은 점을 제2전류 급증점(P_{12})이라 한다. P_{11} 은 미소공극내 방전에 기인하는 것으로서 부분방전 개시전압이나 $\tan \delta$ 증가전압과 비교적 일치하는 경향이 있고, P_{12} 는 미소공극간의 섬락에 기인하는 것으로서 파괴전압과 상관관계가 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 절연진단 시험에 사용되는 파라메타는 교류전류-전압 특성에서 식 (2)와 같이 전류증가율(ΔI)을 계산하여 사용한다. (전력연구원, 1999)

발전기 교류 누설전류 시험중 R, S상은 국부적인 열화가 상당히 진전되어 정격 시험전압까지 인가하지 못하고 상전압에 해당되는 3.8 [kV] 까지 인가하여 시험하였다.



$$\Delta I = \frac{I - I_0}{I_0} \times 100[\%] \quad (2)$$

I : 정격 단자전압 인가시 흐르는 전류

I_0 : 전류가 직선적으로 증가한다고 가정한 경우 정격전압에서의 전류

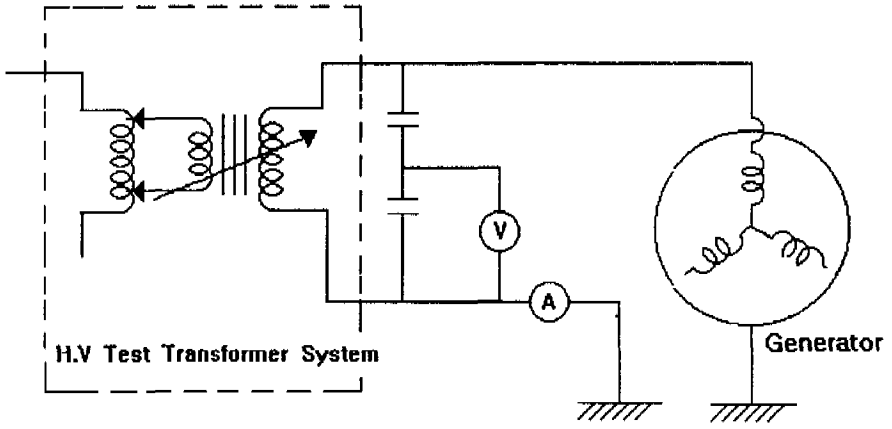


Fig. 5 AC current test circuit

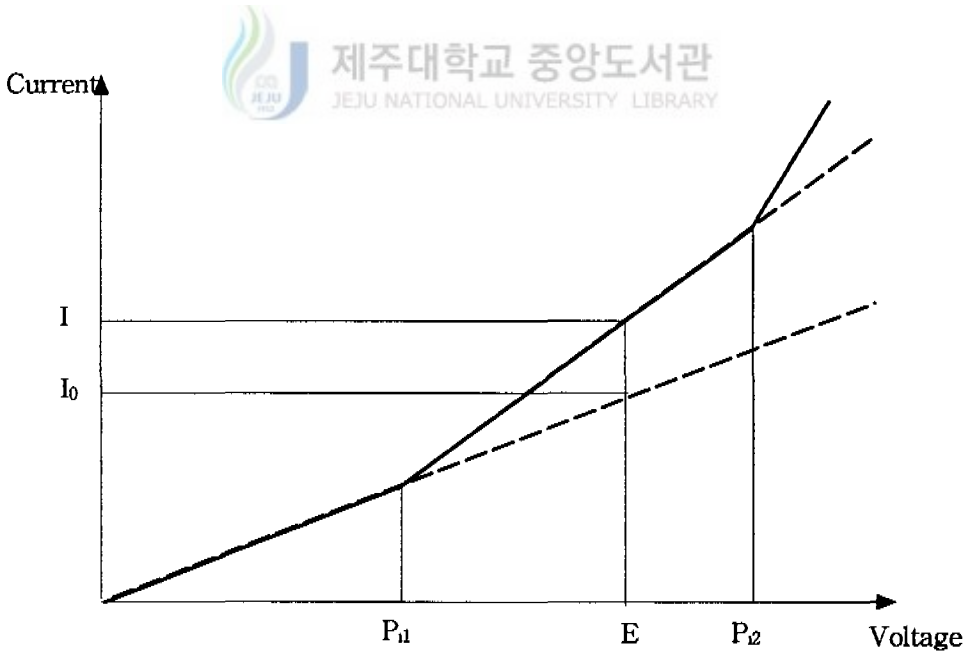


Fig. 6 AC voltage and current curves

6. 유전역률 시험 (Tan δ test)

유전역률 시험은 유전체 절연물에 교류전계를 가할때 일반적으로 누설전류, 유전분극, 부분방전 등에 의한 유전손이라는 에너지 손실이 발생하고, 이를 나타내는 척도로서 $\tan \delta$ 를 사용한다. 이것을 유전정접 또는 유전체 역율이라 하며, 이로부터 흡습, 오손, 미소공극 유무 등의 절연상태 및 열화 정도를 추정하는 시험을 유전역률 시험이라 한다. 시험전압을 증가시킴에 따라 절연물내의 결함에서 부분방전이 발생하면 $\tan \delta$ 가 증가한다는 사실로부터 유전역률 시험에서는 정격전압에서의 $\tan \delta$ 와 부분방전이 나타나지 않는 낮은 전압에서의 $\tan \delta$ 와의 차이인 $\Delta \tan \delta$ 를 이용하여 흡습정도, 오손, 절연상태 및 열화 정도를 추정한다. 이 $\Delta \tan \delta$ 는 절연물의 치수, 형상에 관계없이 부분방전 등에 의한 유전손의 증가분이기 때문에 적을수록 양호한 절연물이라고 할 수 있다. 발전기의 R, S 상은 교류 누설전류시험에서 보듯이 국부적인 열화가 상당히 진전되어 있어 정격 시험전압 까지 인가하지 못하고 3.8 [kV] 까지 하였으나 T상은 6.6 [kV] 까지 인가하여 시험하였고 Fig. 7은 유전역률 시험회로 이다. (전력연구원, 1999)

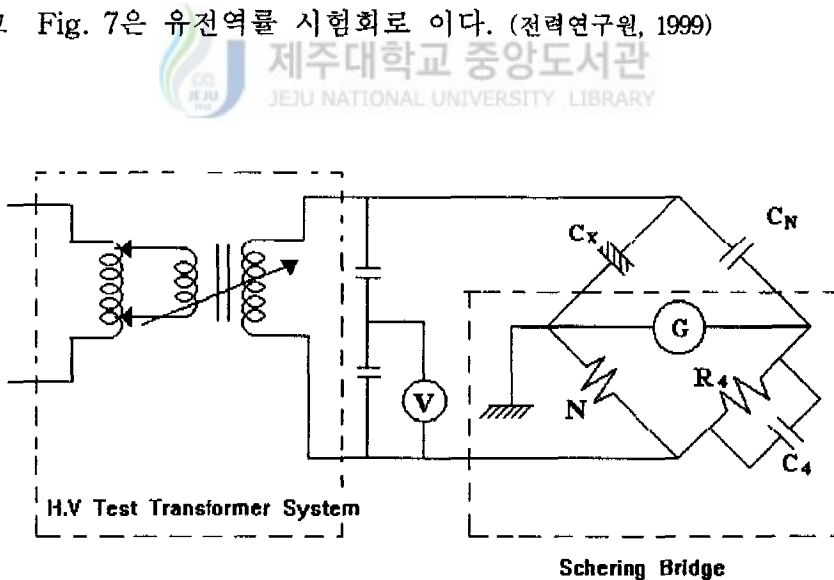


Fig. 7 Circuit for $\tan \delta$ test

7. 단부 권선 진동성 검사(End baskets test)

발전기 고정자 단부 권선의 쇠교자속과 전류에 의한 상호 작용으로 힘이 가해지면서 진동이 발생한다. 이 진동은 진상운전, 단락사고 및 계통으로부터의 써지등 과도적 현상에 대하여 직접적인 영향을 받고 있다.

공진 시험은 단부 구역의 3시 방향에서 반경방향으로 충격을 가하고 9시 방향에서 반응을 측정하며, 반대로 9시 방향에서 충격을 가하고 3시 방향에서 반응을 측정한다. 이와같이 6시와 12시 방향에서도 같은 방법으로 수행하고, 측정된 2쌍의 데이터를 비교하여 거의 같은 FRF(frequency response function)가 측정되었는지 검사하여 단부 구조물이 어느정도로 견고하게 고정되었는지 확인하는 시험이다. 권선의 고유 진동수가 전기적 진동 주파수인 120[Hz]와 일치하는지 여부를 확인하여 발전기 운전중 전기적 진동을 판단한다. G.E사에 의하면 피해야할 주파수 대역은 115-130[Hz] 이며 크기가 0.1[g/lb]이상이 되면 권선 블로킹 등 조치가 필요하다고 권고하고 있다. (전력연구원, 1999)



Ⅲ. 시험결과 및 고찰

본 연구를 위한 시험 대상으로는 17년동안 131,454시간 발전한 북제주화력 1호기 10,000[kW] 발전기로서 냉각방식으로는 공기 냉각기에 의한 폐쇄회로형 냉각방식이며 여자방식으로는 싸리스터 방식을 채용하고 있다. 계획예방정비공사를 거치는동안 레진으로 고정자 절연보강을 부분적으로 실시하였으며 1983부터 발전기 브리쉬를 국산화하여 계속 사용하고 있고 시험과 측정에 이용한 발전기 정격은 Table 1과 같다.

Table 1 Specifications of the synchronous generator

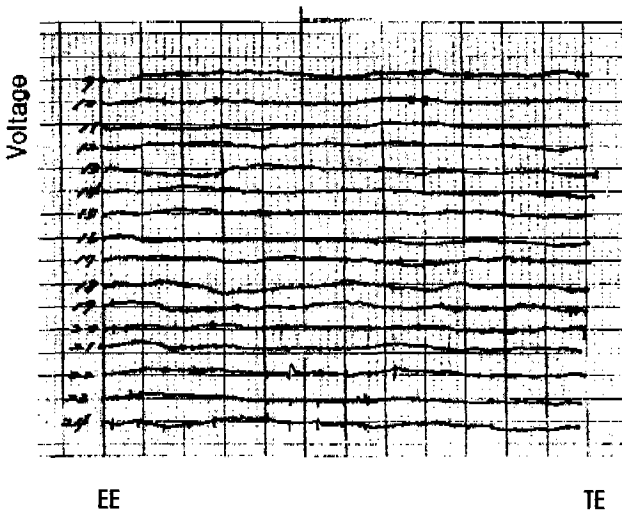
Item	Data
capacity	12,500 KVA
voltage	6,600 V
current	1,094 A
exciter volt, current	100 V, 400 A
number of phase	3 ϕ
power factor	0.8
revolution	3600 rpm
frequency	60 Hz
insulation class	B
stator coil connection	Y
neutral connection	100 A resistance earth
install year	1982. 11
starting and stop times	58
generation hours	131,454 Hr
ser. no.	KB69070L1
manufacture	FUJI (Japan)

1. 고정자 철심 건전성 시험 결과 (EL-CID)

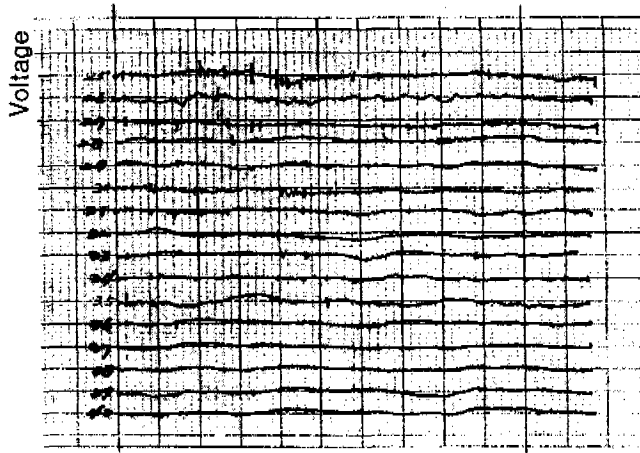
고정자 철심 건전성 시험을 위해 모든 철심을 EE(excitor end)측에서 TE(turbine end)측 방향으로 슬롯 수에 해당되는 66회 스캔하여 단락상태 이상전류를 측정하였으나 Fig. 8에서 보는바와 같이 심한 전류의 변화치는 확인 할 수 없었고 모두 기준치 100[mV], 100[mA] 이하로 양호하게 나타났다.



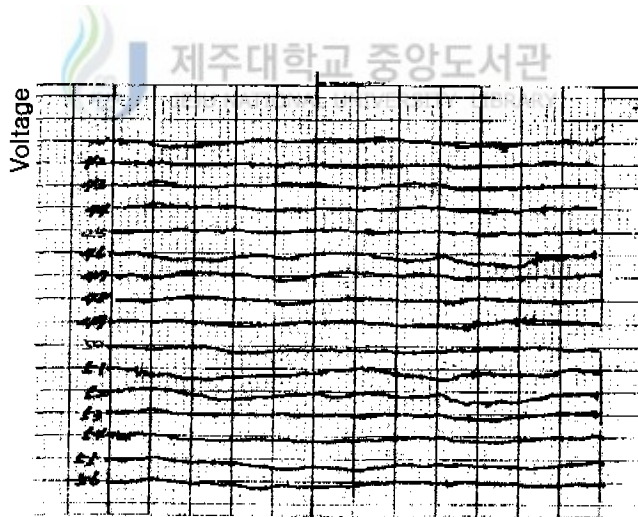
(a) Slot No. 1 - 8 (100mV/Div)



(b) Slot No. 9 - 24 (50mV/Div)



EE TE
 (c) Slot No. 25 - 40 (50mV/Div)



EE TE
 (d) Slot No. 41 - 56 (50mV/Div)

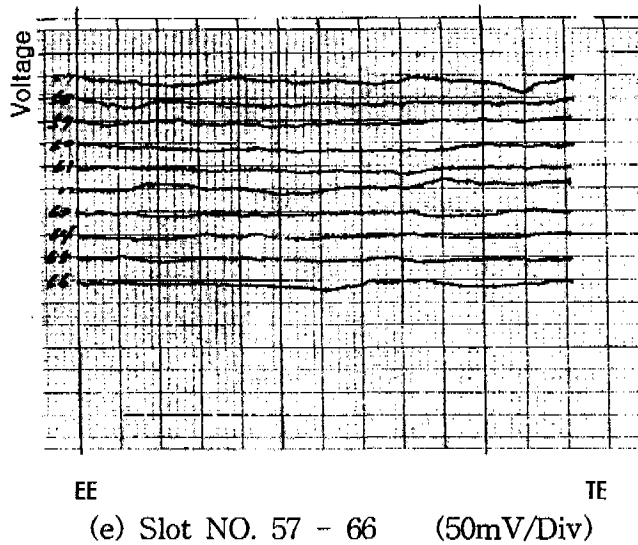


Fig. 8 EL-CID test results at stator core



2. 고정자 웨지 조임성 검사

고정자 웨지 330개 전체를 검사한 결과 매우단단 284개 (86%:흰색), 단단 43개 (13%:분홍), 헐거움 3개 (1%:청색), 매우 헐거움 0개 (0%)로 수집된 데이터를 Table 2에서와 같이 컬러코드로 작성하여 나타냈으며 전반적인 상태는 양호하다. 따라서 재웨징은 필요치 않다.

Table 2 Results of strike sound measurement

슬롯번호 웨이번호	1			2			3			4			5		
	EE	C	TE	EE	C	TE	EE	C	TE	EE	C	TE	EE	C	TE
1															
2															
3															
4															
5															
6															
7															
8															
9															
10															
11															
12															
13															
14															
15															
16															
17															
18															
19															
20															
21															
22															
23															
24															
25															
26															
27															
28															
29															
30															
31															
32															
33															
34															
35															
36															
37															
38															
39															
40															
41															
42															
43															
44															
45															
46															
47															
48															
49															
50															
51															
52															
53															
54															
55															
56															
57															
58															
59															
60															
61															
62															
63															
64															
65															
66															

: loose or hollow
 : tight
 : verytight

3. 직류 전류시험 (P.I Test)

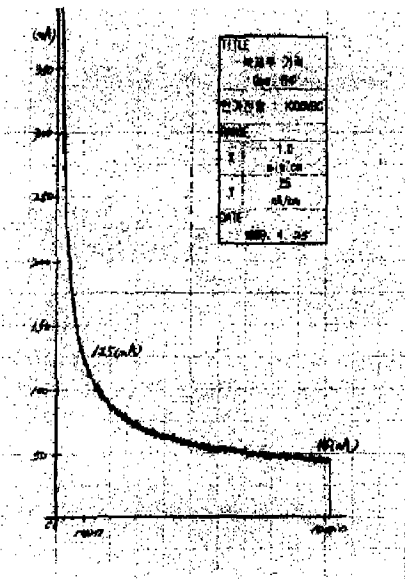
직류 전류시험은 Table 3 및 Fig. 9에서 보는바와 같이 고정자는 1000[V]의 전압으로 시험한 결과 P.I는 R상 2.78, S상 4.0, T상 4.28로 양호 판정상태 기준인 1.5 이상이 되어 문제는 없으나 회전자의 전압은 100[V]가 정격이므로 절연 내압을 감안하여 500[V]의 전압으로 시험한 결과 P.I는 Table 4 및 Fig. 10과 같이 1.06으로 현재 흡습되어 있기 때문에 건조시킨 후 조립하여야 하며 향후 운전관리 및 정지중 보관방법에 특별한 주의가 필요하다.

Table 3 Results of P.I test at stator (DC 1000V)

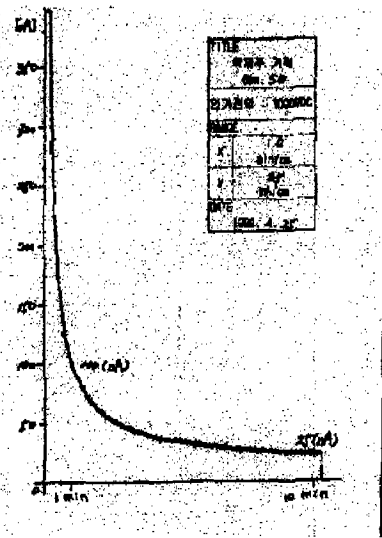
측정값 상	1분값(nA)	10분값(nA)	PI	판정기준	판정
R	125	45	2.78	≥1.5:양호 ≤1.5:불량	양호
S	100	25	4.00		양호
T	107	25	4.28		양호

Table 4 Results of P.I test at rotor (DC 500V)

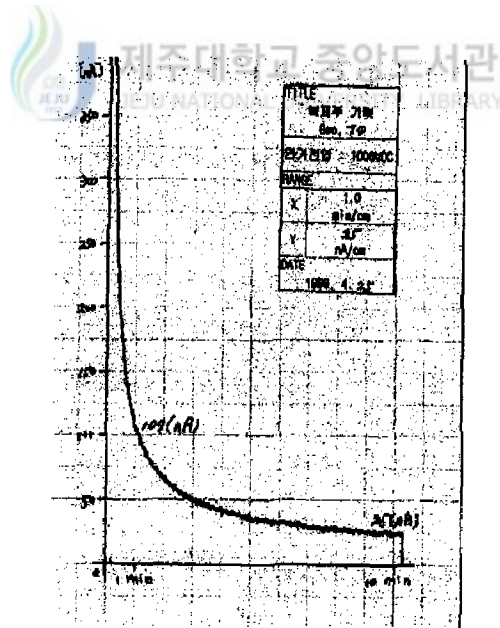
구 분	1분값(μA)	10분값(μA)	PI	판정기준	판 정
Rotor	49	46	1.06	≥1.5:양호 ≤1.5:불량	불 량



(a) R-phase



(b) S-phase



(c) T-phase

Fig. 9 DC current of P.I test at stator

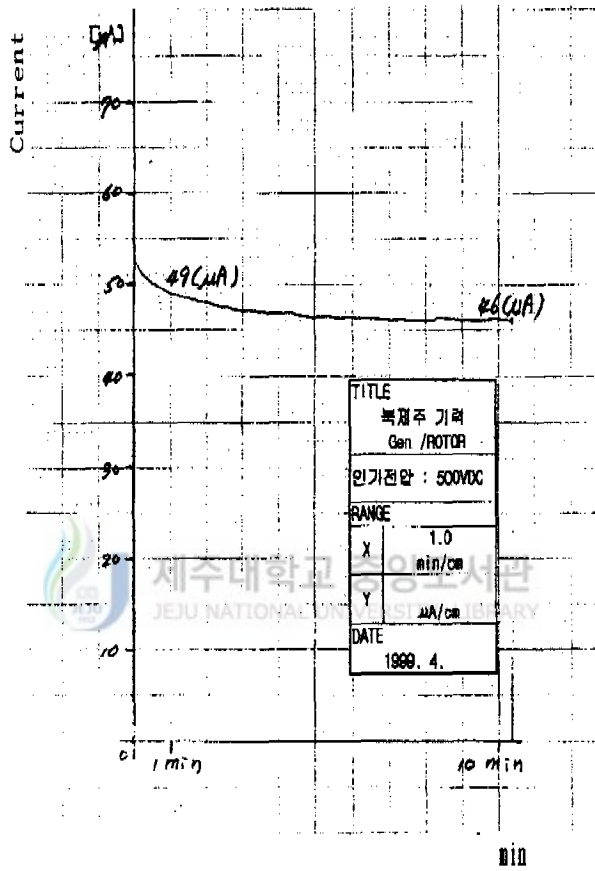


Fig. 10 DC current of P.I test at rotor

4. 부분방전 시험 (Partial discharge : PD)

부분방전 시험에서는 1000 [pC]의 부분방전 개시 전압을 측정된 결과 R, S, T상 각각 2.1 [kV], 1.6 [kV], 2.7 [kV]로 나타났으며 R, S상은 상전압인 3.8 [kV]를 인가하여 시험한 결과 70,000 [pC]의 방전전하량으로 나타나 불량기준인 30,000 [pC]을 초과하게 되어 더 이상 시험전압을 증가하지 못하고 중단하였으나 T상은 4.5 [kV]까지 시험한 결과 12,000 [pC]으로 요주의 상태로 판정하였고 결과는 Table 5 및 Fig. 11과 같다.

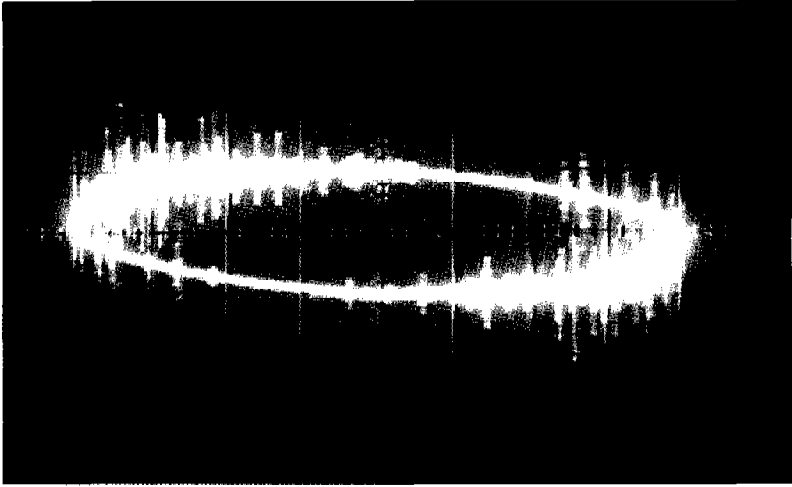
Table 5 Results of partial discharge

측정값 상	부분방전 개시전압	부분방전 소멸전압	최대 부분방전 전하량		판정기준	판 정
			3.8KV	4.5KV		
R	2.1KV	1.7KV	70,000	—	≥10,000	—
S	2.6KV	1.4KV	70,000	—	:요주의	—
T	2.7KV	2.6KV	5,000	12,000	≤30,000 :불량	요주의

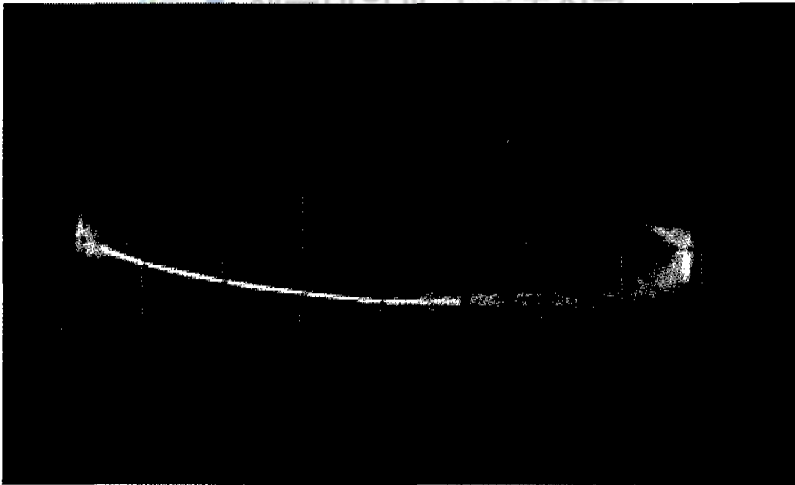
제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



(a) R-phase



(b) S-phase



(c) T-phase

Fig. 11 Test results of partial discharge

5 교류 전류 시험 (AC current test)

교류 전류 시험 결과는 R, S상은 부분방전 시험에서 알수 있듯이 국부적인 열화가 상당히 진전되어 있어 시험전압을 정격까지 인가하지 못하고 상전압에 해당되는 3.8 [kV] 까지 인가하여 시험하였음에도 Table 6, 7 및 Fig. 12, 13에서 보듯이 상태판정이 불가능 하였지만 T상은 6.6kV까지 인가하여 시험한 결과 양호하였고 그 결과는 Table 8 및 Fig. 14과 같다.

Table 6 Test results of AC current at R-phase

Voltage [V]	Current [mA]	Ratio [mA/kV]	Remark
1025.6	37.5	36.56	
1483.7	54.1	36.46	
1990.6	72.6	36.47	
2484.9	90.5	36.42	
3014.2	110.1	36.53	
3783.8	138.0	36.47	

$\Delta I(\%)$	0.00	판정기준	$\Delta I < 12$
----------------	------	------	-----------------

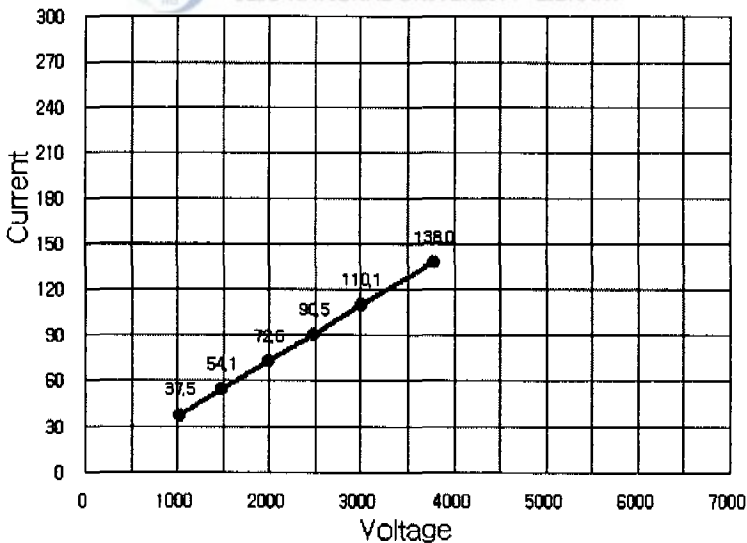


Fig. 12 Test results of AC current at R-phase

Table 7 Test results of AC current at S-phase

Voltage [V]	Current [mA]	Ratio [mA/kV]	Remark
1004.5	36.3	36.14	
1485.7	53.9	36.28	
2018.3	72.8	36.07	
2502.7	90.7	36.24	
2976.6	108.4	36.42	
3790.4	137.5	36.28	

$\Delta I(\%)$	0.00	판정기준	$\Delta I < 12$
----------------	------	------	-----------------

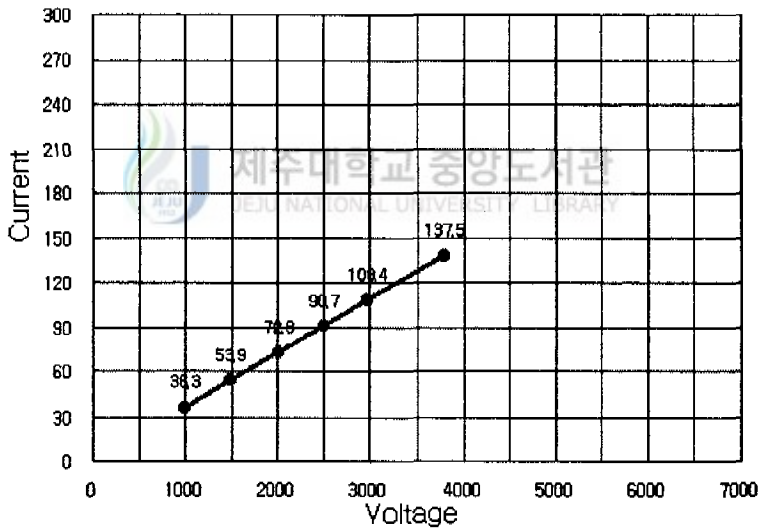


Fig. 13 Test results of AC current at S-phase

Table 8 Test results of AC current at T-phase

Voltage [V]	Current [mA]	Ratio [mA/kV]	Remark
1015.1	37.4	36.84	
1483.0	54.5	36.75	
2036.8	74.5	36.58	
2457.2	89.5	36.42	
2990.5	108.9	36.42	
3783.8	138.2	36.52	
4491.3	164.2	36.56	
4973.1	181.9	36.58	
5496.5	201.4	36.64	
5973.7	219.6	36.76	
6580.9	243.1	36.94	
$\Delta I(\%)$	1.43	판정기준	$\Delta I < 12$

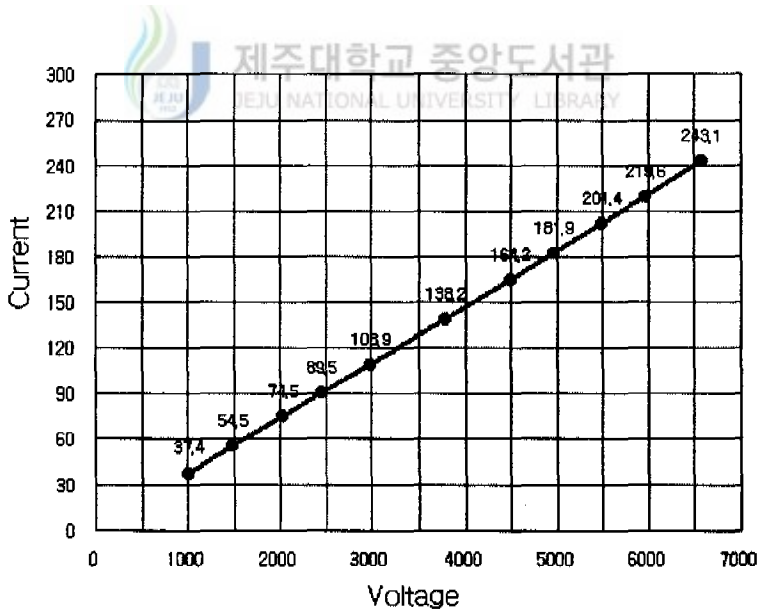


Fig. 14 Test results of AC current at T-phase

6 유전역률 시험 (Tan δ test)

유전 역률시험 결과 R, S상 역시 Table 9, 10 및 Fig. 15, 16와 같이 시험 전압을 3.8 [kV] 이상 인가하지 못하여 상태판정이 불가능 하였으나 T상은 6.6 [kV] 까지 인가하여 시험한 결과 Table 11 및 Fig. 17 같이 1.386%로 양호한 결과를 얻었다.

Table 9 Test results of $\tan \delta$ at R-phase

Voltage [V]	Tan δ [%]	Capacitance [nF]	Remark
1.0	3.310	94.16	
2.0	3.310	94.16	
3.0	3.310	94.16	
3.8	4.042	94.28	
$\Delta \text{Tan } \delta$ (%)	0.732	판정기준	$\Delta \tan \delta < 6.5$

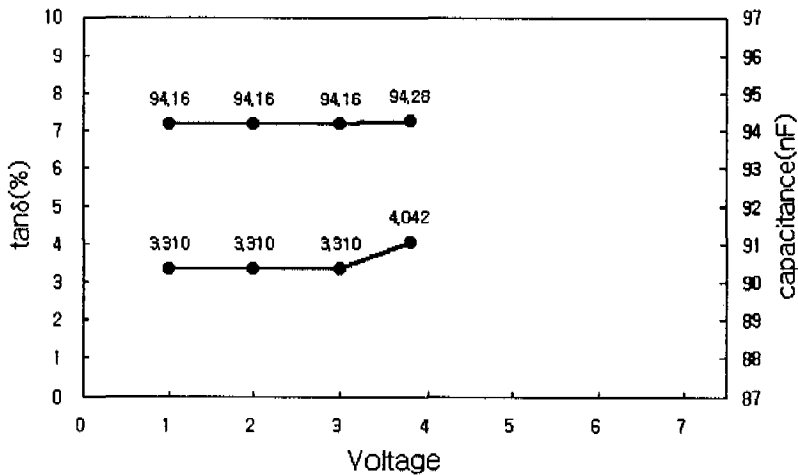


Fig. 15 Test results of $\tan \delta$ at R-phase

Table 10 Test results of $\tan \delta$ at S-phase

Voltage [V]	Tan δ [%]	Capacitance [nF]	Remark
1.0	3.925	93.65	
2.0	3.925	93.65	
3.0	4.031	93.72	
3.8	4.086	93.97	

$\Delta \text{Tan } \delta$ (%)	0.161	판정기준	$\Delta \text{tan } \delta < 6.5$
---------------------------------	-------	------	-----------------------------------

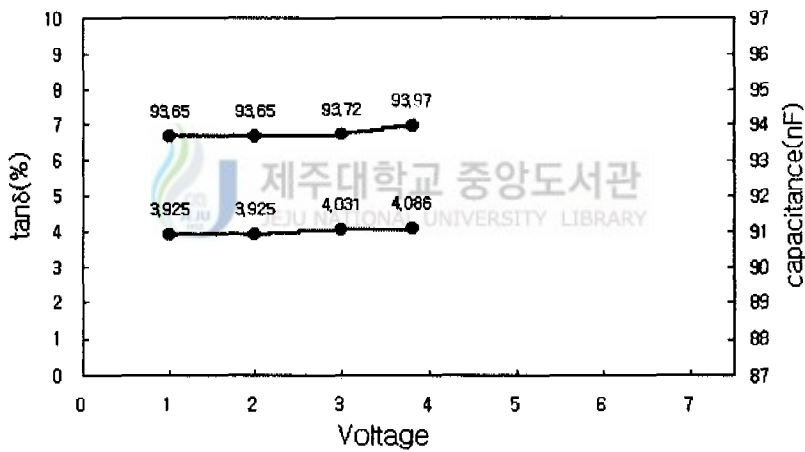


Fig. 16 Test results of $\tan \delta$ at S-phase

Table 11 Test results of $\tan \delta$ at T-phase

Voltage [V]	Tan δ [%]	Capacitance [nF]	Remark
1.0	4.816	94.76	
2.0	4.816	94.76	
3.0	4.816	94.76	
4.0	5.200	95.02	
5.0	5.600	95.53	
6.0	5.912	96.04	
6.6	6.202	96.42	

Δ Tan δ (%)	1.386	판정기준	$\Delta \tan \delta < 6.5$
---------------------------	-------	------	----------------------------

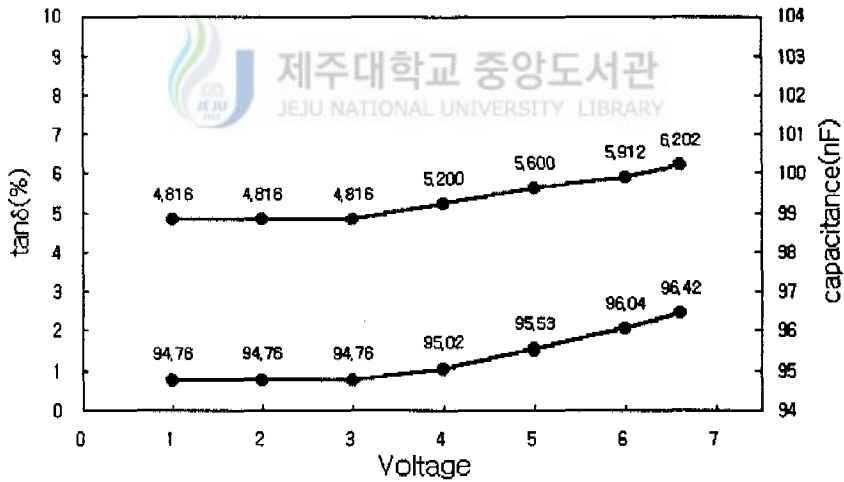
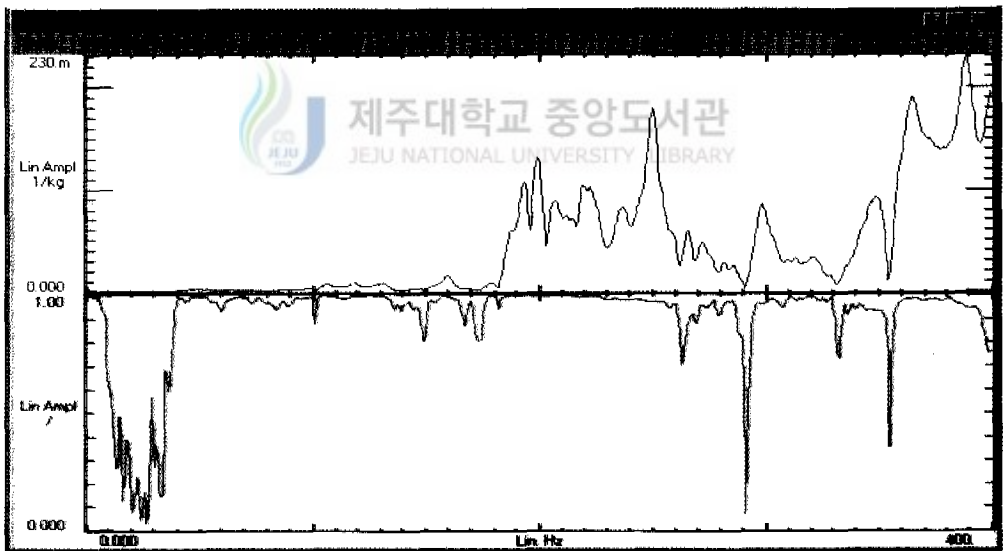


Fig. 17 Test results of $\tan \delta$ at T-phase

7. 단부 권선 진동성 검사 (End baskets test)

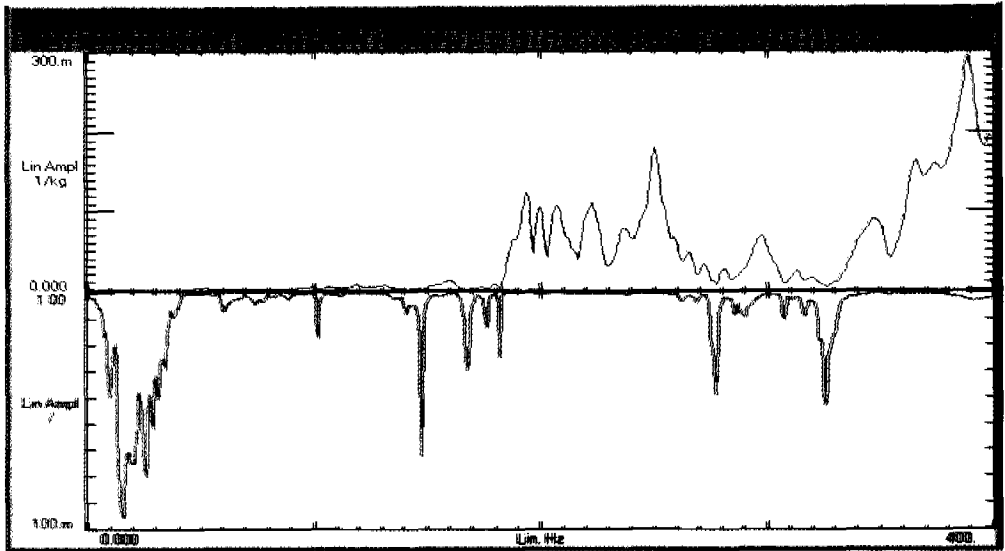
1) Exciter측 3-9시 방향

End baskets 진동성 공진검사는 Fig. 18 (a)에서 보는바와 같이 exciter 측의 3시 방향에서 힘을 가하고 9시에서 반응을 측정하였으며, 반대로 9시 방향에서 힘을 가해서 3시 방향에서 반응을 측정한 것이 (b)이며 (c)는 (a)와 (b)를 각각 상, 하로 비교하였으며 (d)는 (a), (b)의 결과를 동시에 비교한 것으로 FRF (frequency response function)가 거의 같으며 전기적 진동 주파수인 120 [Hz]에서는 진동이 발생하지 않았다. 따라서 전기적 영향은 없으며 권선 묶음 상태도 양호하고 발전기 단부에 대한 교정작업도 필요치 않다.



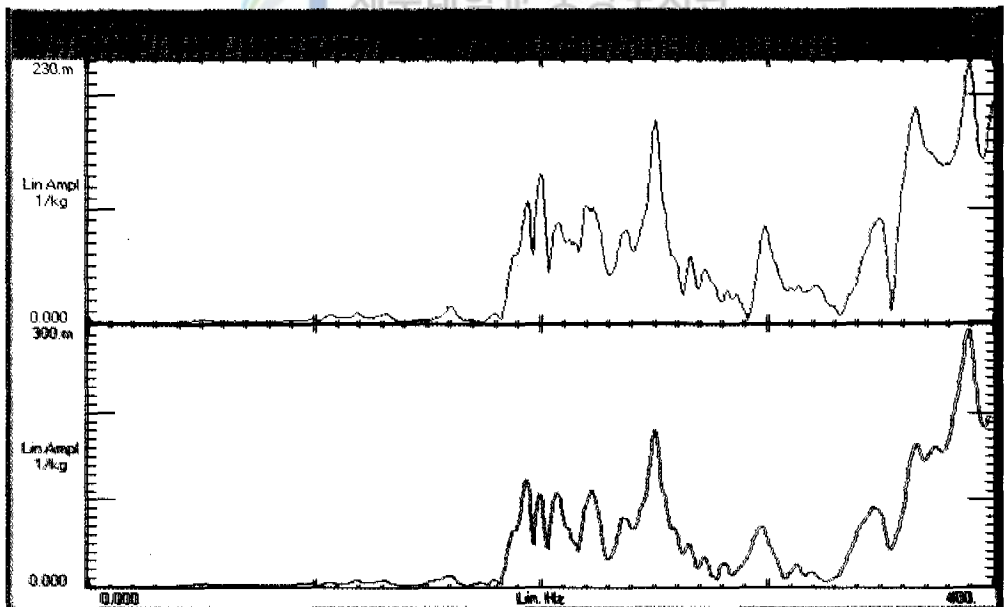
(a) Test result of exciter end side

(excitation Force : 3 clock direction, vibration response : 9 clock direction)

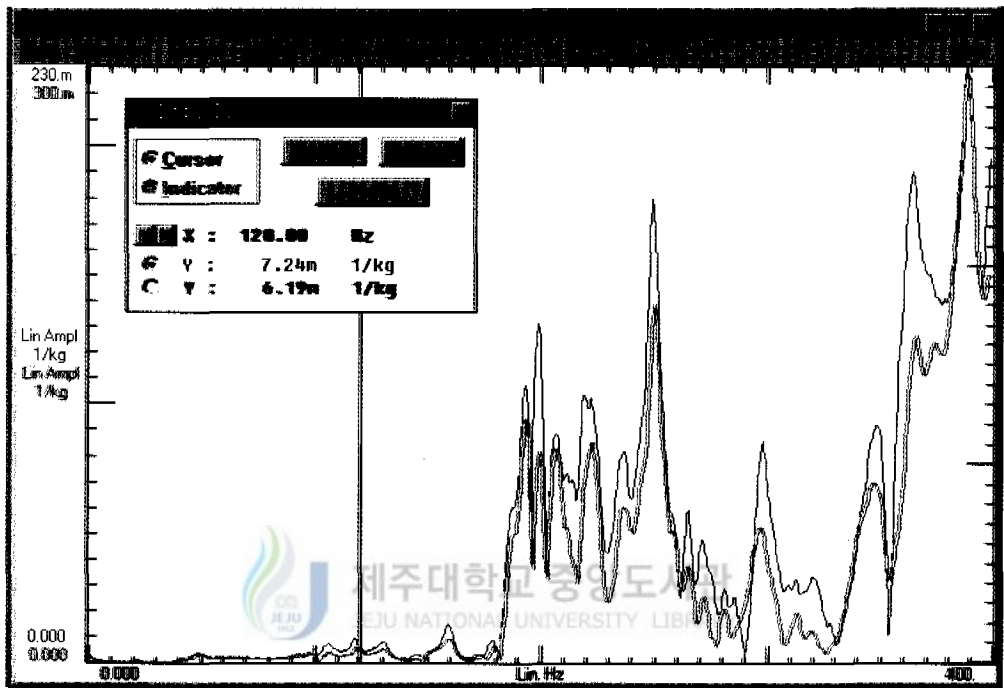


(b) Test result of exciter end side

(excitation Force : 9 clock direction, vibration response : 3 clock direction)



(c) Comparative data of exciter end side (a) and (b)

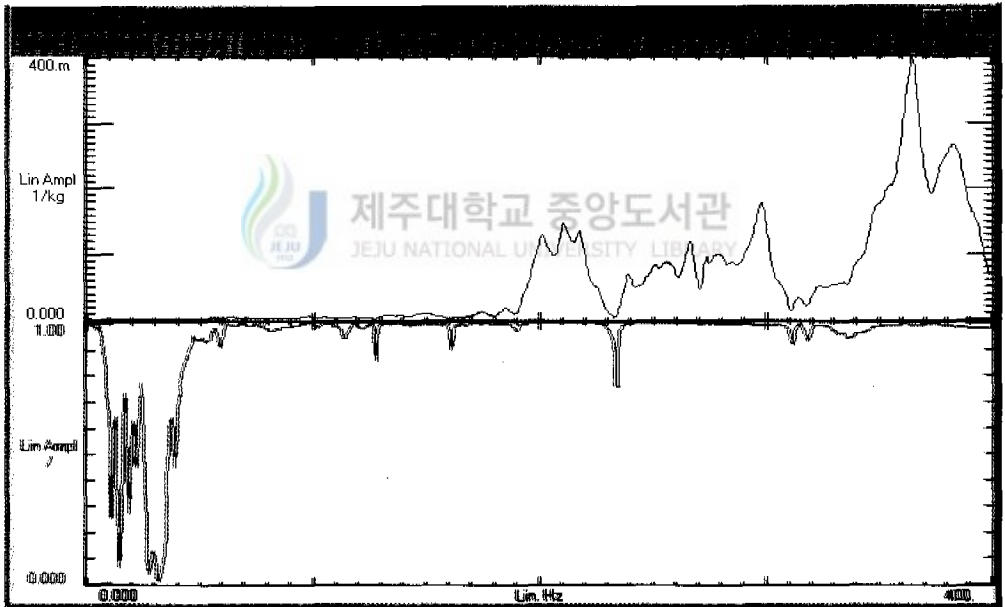


(d) Comparative data of exciter end side (a) and (b)

Fig. 18 Test result of exciter end baskets at 3-9 clock directions

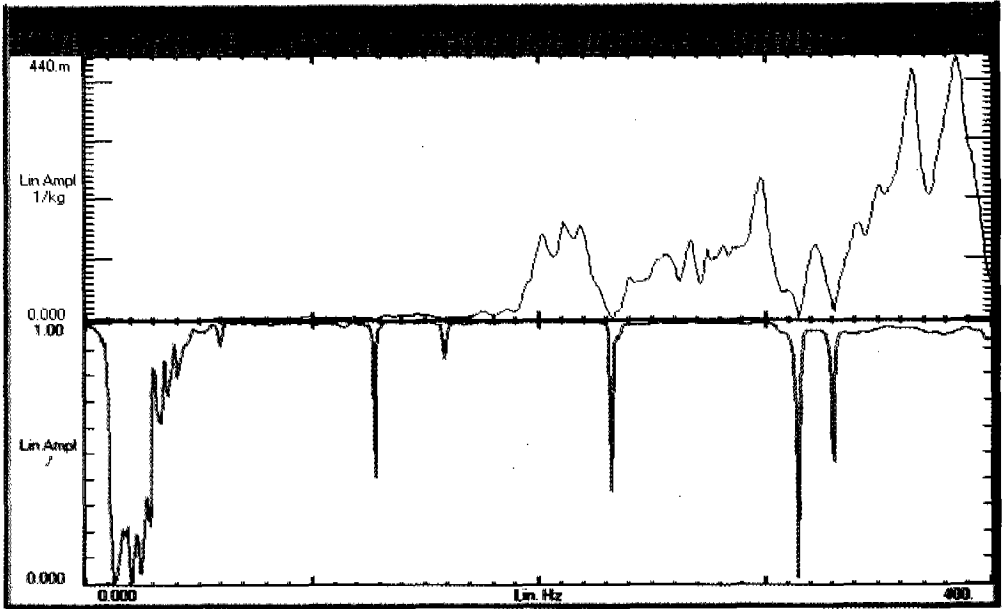
2) Exciter측 6-12시 방향

Fig. 19 (a)에서 보는바와 같이 exciter측의 6시 방향에서 힘을 가하고 12시에서 반응을 측정하였으며, 반대로 12시 방향에서 힘을 가해서 6시 방향에서 반응을 측정한 것이 (b)이며 (c)는 (a)와 (b)를 각각 상, 하로 비교하였으며 (d)는 (a), (b)의 결과를 동시에 비교한 것으로 FRF가 거의 같으며 전기적 진동 주파수인 120 [Hz] 에서도 역시 진동이 발생하지 않았다. 따라서 전기적 영향은 없으며 권선 묶음상태도 양호하고 발전기 단부에 대한 교정작업도 필요치 않은 것으로 판정된다.



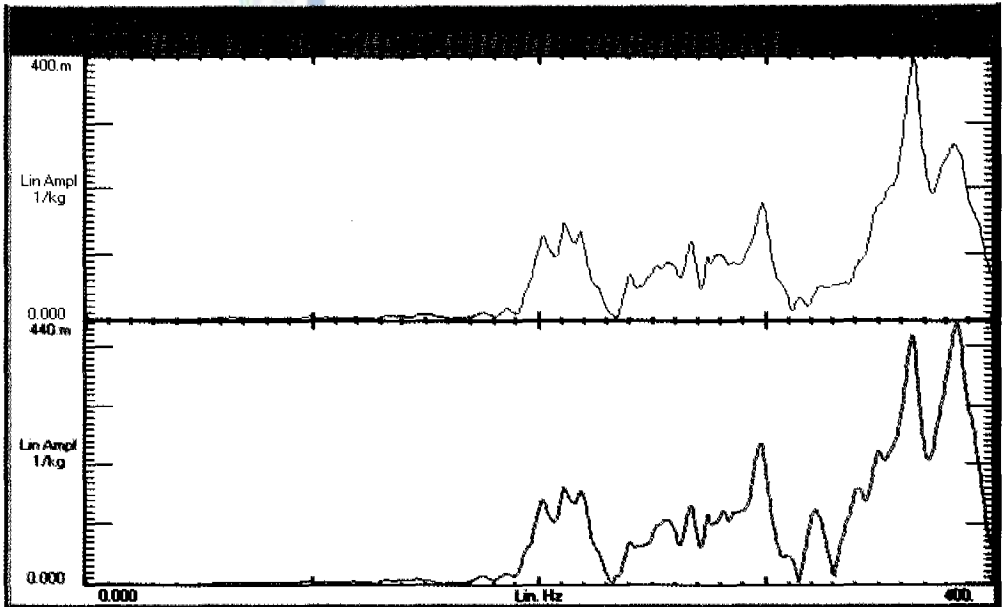
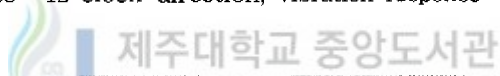
(a) Test result of exciter end side

(excitation force : 6 clock direction, vibration response : 12 clock direction)

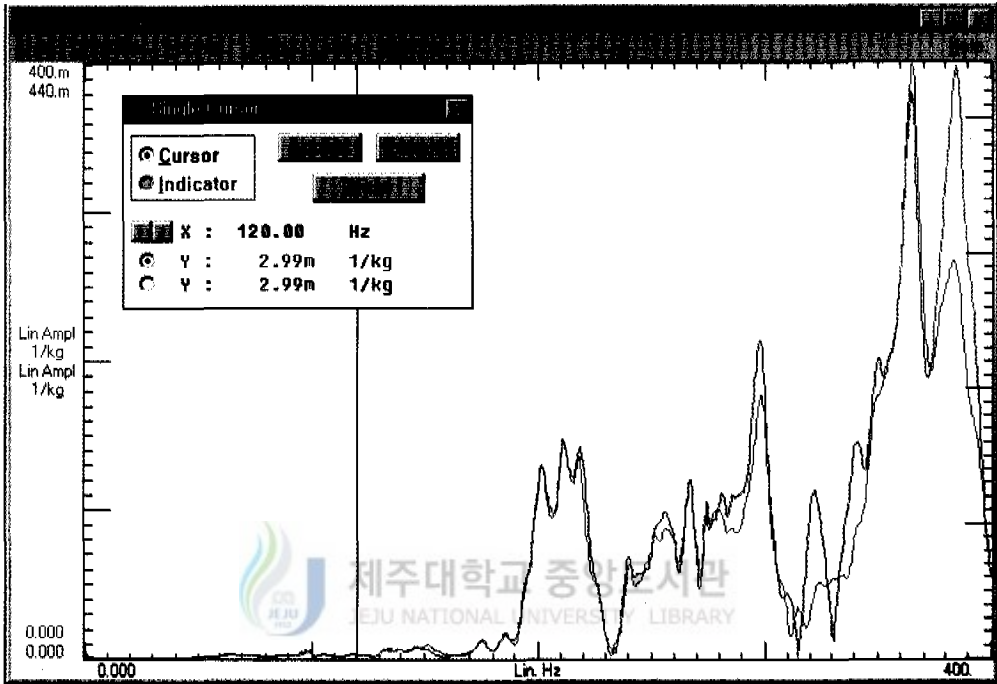


(b) Test result of exciter end side

(excitation force : 12 clock direction, vibration response : 6 clock direction)



(c) Comparative data of exciter end side (a) and (b)

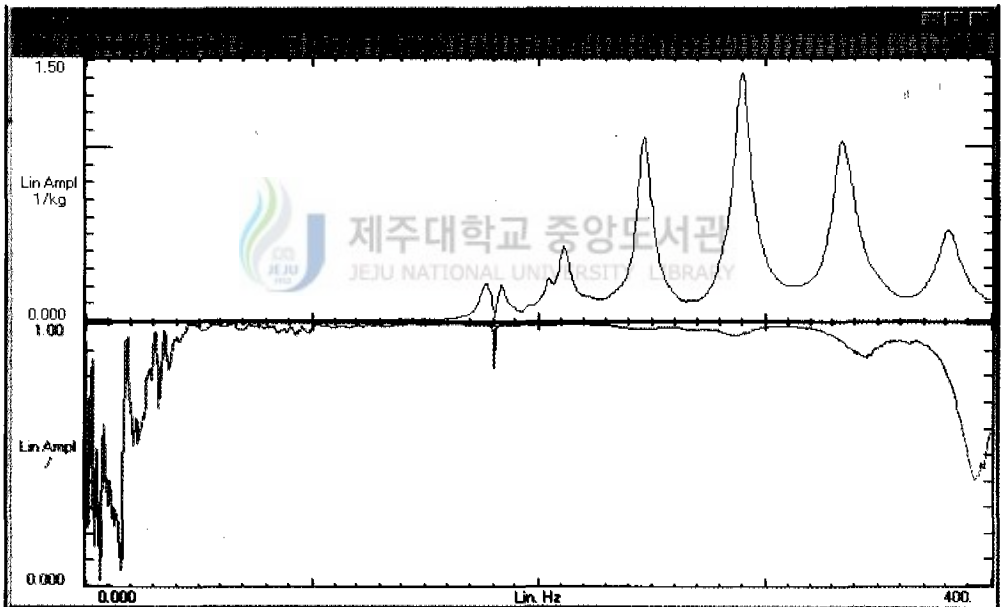


(d) Comparative data of exciter end side (a) and (b)

Fig. 19 Test result of end baskets at 6-12 clock directions

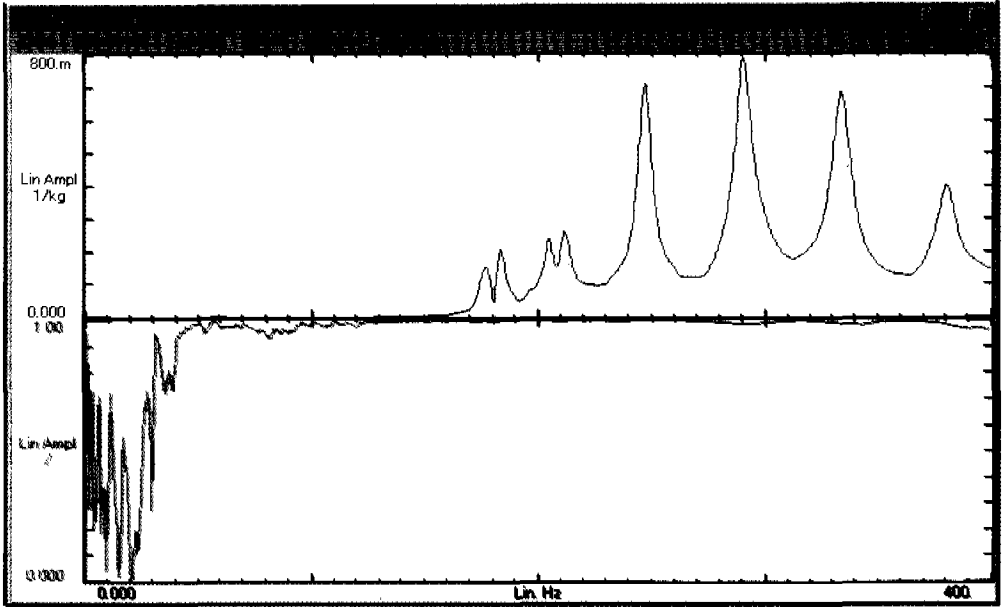
3) Turbine측 3-9시 방향

단부 진동성 공진검사는 Fig. 20 (a)는 turbine측의 3시 방향에서 힘을 가하고 9시에서 반응을 측정하였으며, 반대로 9시 방향에서 힘을 가해서 3시 방향에서 반응을 측정한 것이 (b)이며 (c)는 (a)와 (b)를 각각 상, 하로 비교하였으며 (d)는 (a), (b)의 결과를 동시에 비교한 것으로 FRF가 거의 같으며 전기적 진동 주파수인 120 [Hz]에서는 진동이 발생하지 않았다. 따라서 전기적 영향은 없으며 권선 묶음상태도 양호하고 발전기 단부에 대한 교정작업도 필요치 않다.



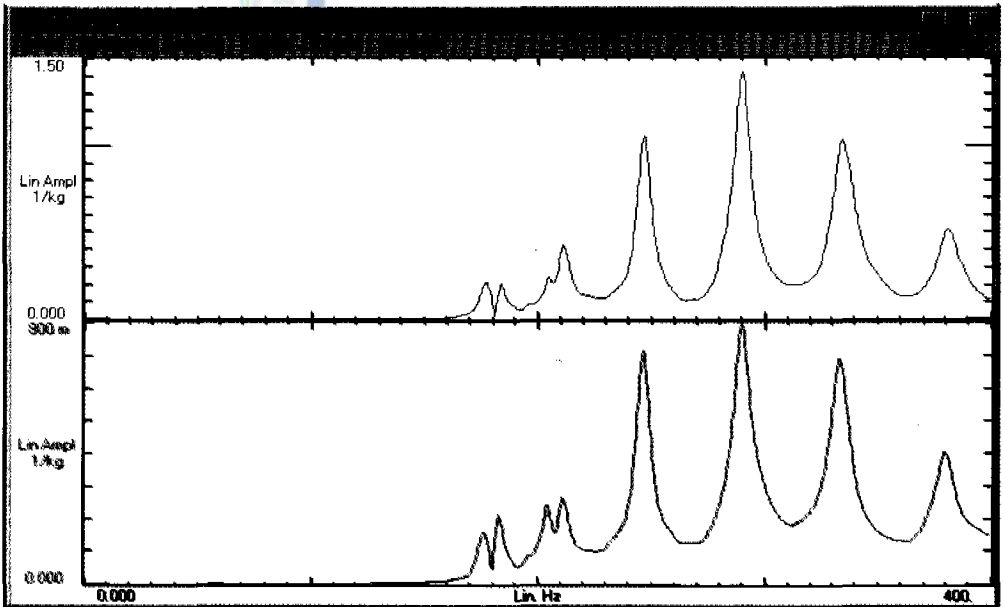
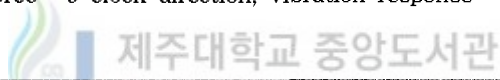
(a) Test result of turbine end side

(excitation force : 3 clock direction, vibration response : 9 clock direction)

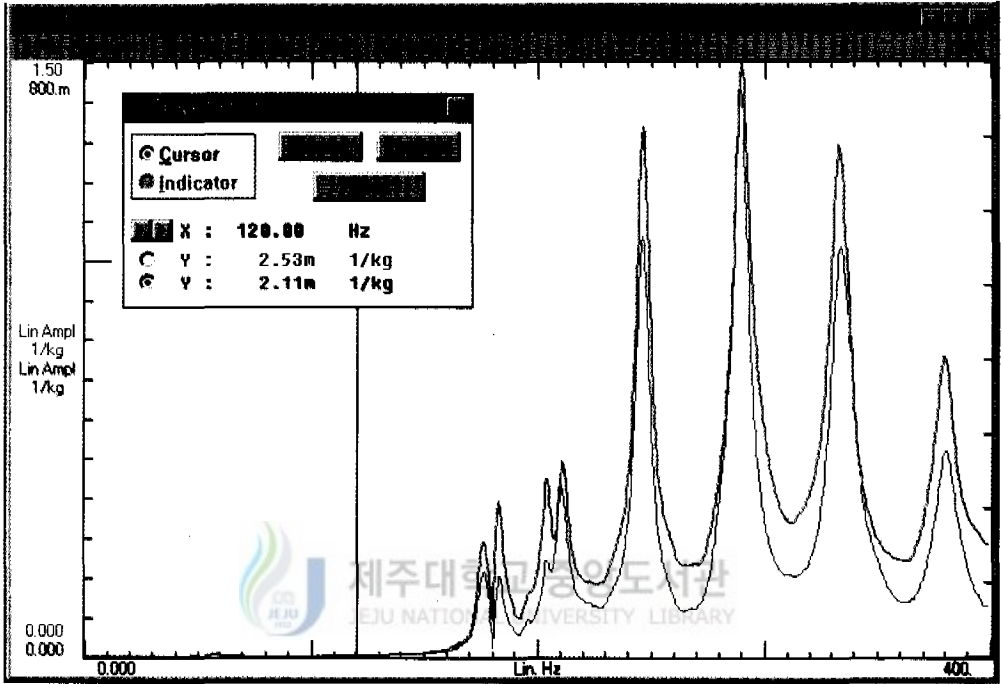


(b) Test result of turbine end side

(excitation force : 9 clock direction, vibration response : 3 clock direction)



(c) Comparative data of turbine end side (a) and (b)

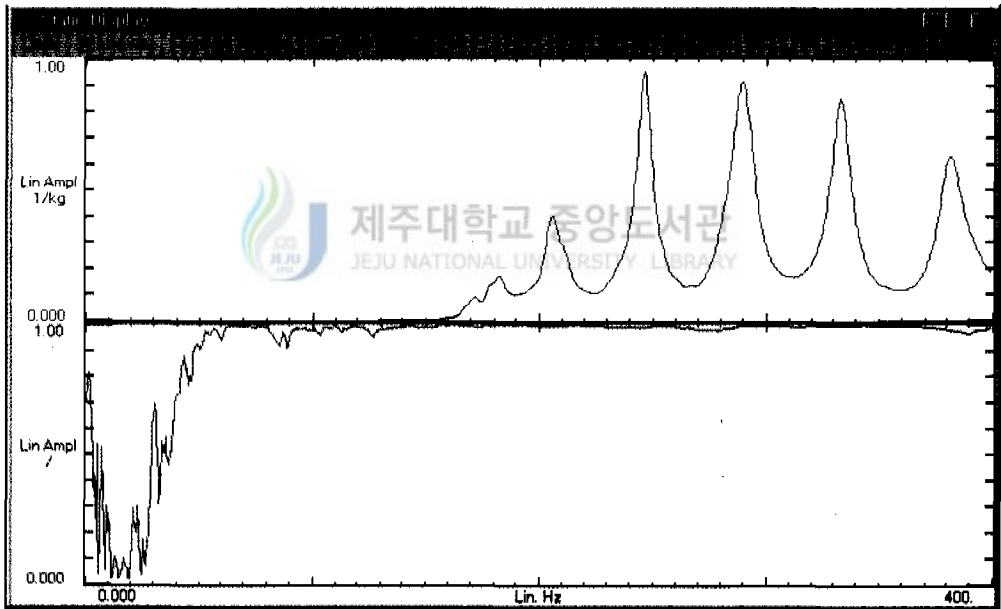


(d) Comparative data of turbine end side (a) and (b)

Fig. 20 Test result end baskets at 3-9 clock directions

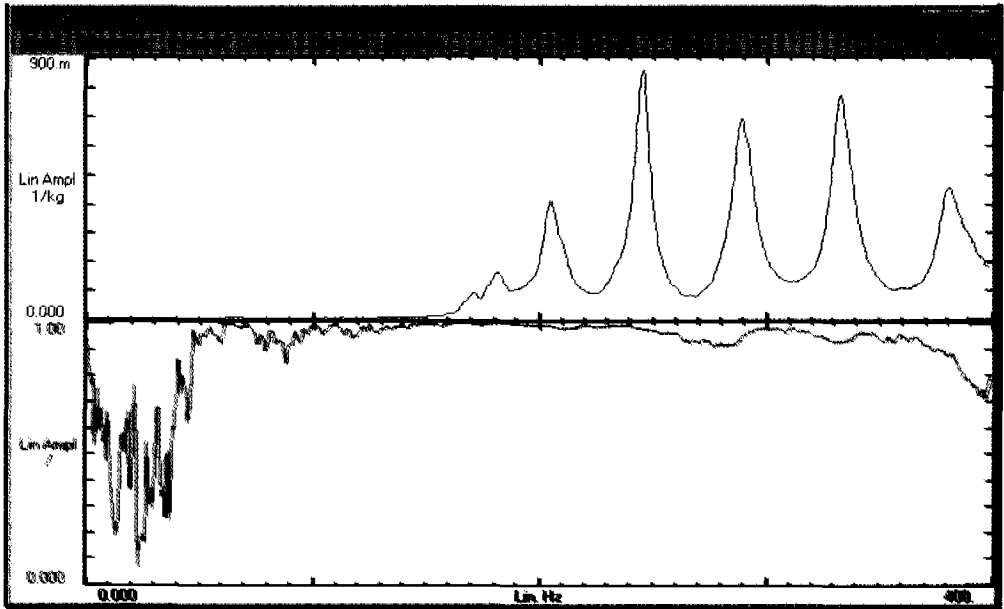
4) Turbine측 6-12시 방향

Fig. 21은 (a)에서 보는바와 같이 turbine측의 6시 방향에서 힘을 가하고 12시에서 반응을 측정하였으며, 반대로 12시 방향에서 힘을 가해서 6시방향에서 반응을 측정한 것이 (b)이며 (c)는 (a)와 (b)를 각각 상,하로 비교하였으며 (d)는 (a), (b)의 결과를 동시에 비교한 것으로 FRF가 거의 같으며 전기적 진동 주파수인 120 [Hz] 에서도 역시 진동이 발생하지 않았다. 따라서 전기적 영향은 없으며 권선 묶음상태도 양호하고 발전기 단부에 대한 교정작업도 필요치 않은 것으로 판정된다.



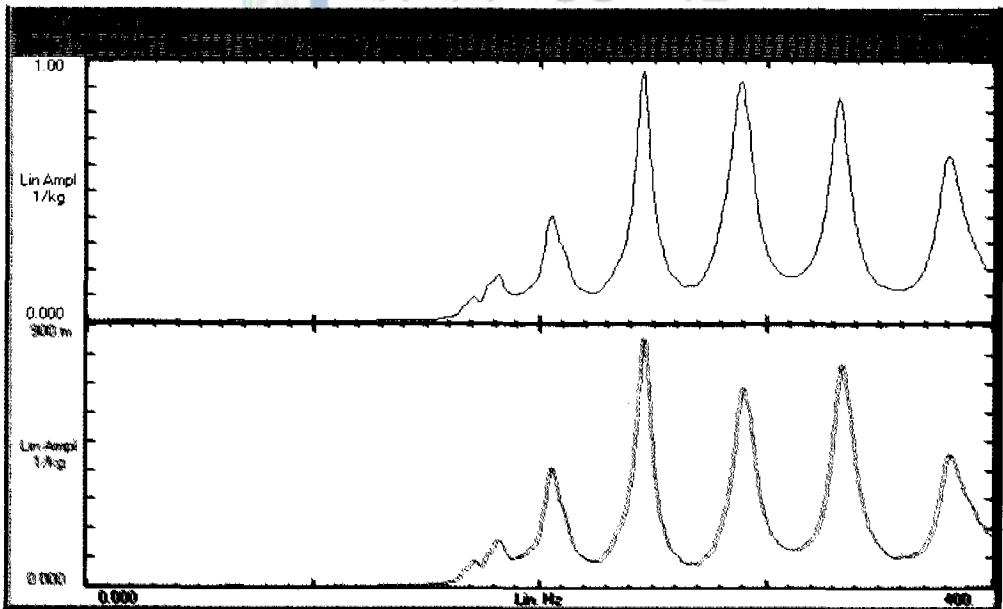
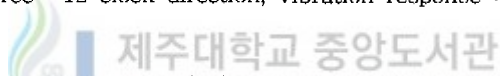
(a) Test result of turbine end side

(excitation force : 6 clock direction, vibration response : 12 clock direction)

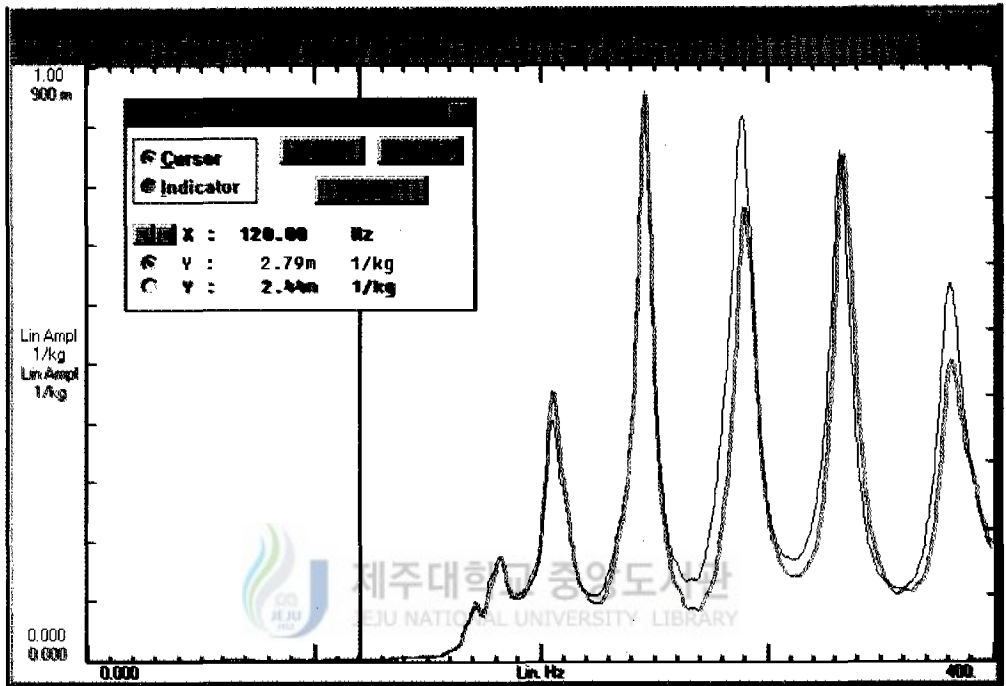


(b) Test result of turbine end side

(excitation force : 12 clock direction, vibration response : 6 clock direction)



(c) Comparative data of turbine end side (a) and (b)



(d) Comparative data of turbine end side (a) and (b)

Fig. 21 Test result of end baskets at 6-12 clock directions

IV. 결 론

북제주화력 1호기 발전기 수명진단을 위해 고정자 철심 건전성 시험, 고정자 웨지 조임성 검사, 직류 전류 시험, 부분방전 시험, 교류 전류 시험, 유전역률 시험 및 발전기 단부 진동성 검사 등 7가지 시험을 각각 시행한 결과 66개 슬롯의 철심열화 상태는 MPD기준 100[mA]이하로 모두 양호하였으며 고정자 웨지의 헐거운 정도는 불연속 1[%]이므로 재웨징이 필요치 않다. 부분방전 시험의 경우 R, S상에서 방전전하량이 심하여 3.8[kV]에서 중단하였으나 T상은 4.5[kV]까지 인가한 결과 12,000[pC]으로 주의를 요하는 것으로 판단된다. R, S상의 방전상태가 계속 진행될 경우 발전기 고정자에 대형사고가 발생할 가능성이 있으므로 보다 효과적인 관리 및 지속적인 트렌드 관리가 필요하며 수명연장을 위해서는 빠른 시간내에 전반적인 절연보강이 필요하다 하겠다. 교류전류 시험과 유전역률 시험의 경우 역시 R, S상은 시험을 하지 못하였고 T상의 경우 ΔI 1.43 [%], $\Delta \tan \delta$ 1.386 [%]로 양호하게 판정되어 발전기의 효율적인 수명관리를 제안하였다.

수명진단 시험 및 평가 방법에 대해서는 어느 한가지 방법으로는 양, 부를 판단할 수 없으며 여러 가지 시험을 통한 종합평가가 요구된다 하겠다. 또한 수명평가의 신뢰성을 높이기 위해서는 시험값에 대한 판정기준이 보다 더 정확히 정립되어야 한다고 사려되며 아울러 발전기 수명진단에서 높은 신뢰도로 평가 할 수 있는 부분방전 연구 및 시험에 많은 노력이 필요할 것으로 생각한다.

참 고 문 헌

발전교육원, 1998, 전기설비 신기술 세미나, 한국전력공사. pp.27-28, 32-41.

김희동, 1998, 발전기 고정자 권선에서 절연재료의 물성과 절연열화 평가, 홍익대학교 박사학위 논문. pp.1-4.

J. S Simons, 1980, Diagnostic Testing of High-Voltage Machine Insulation, IEE Proceedings Vol. 127, Pt. B, No. 13.

H. Yoshida and Y. Inoue, Test Method of Rotating Machines, IEEE, Trans, Electr. Insulation. Vol. EI,-21, No. 6.

池田易行, 深川裕正, 1989, 合成レジン 絶縁 發電機 捲線の 絶縁劣化 判定法, 日本 電力中央研究所 研究 報告.

日本電氣學會, 昭和59, 絶縁劣化 診断 試験 方法, 電氣學會 技術報告 2部 第182号.

발전교육원, 1998, 전기 정비 기술, 한국전력공사. pp.16-21.

D. G. Edwards, 1994, Planned Maintenance of High Voltage Rotating Machine Insulation based upon Information Derived from On-Line Discharge Measurements, IEE Conference Publication No. 401.

R. E. James and B. T. Phung, 1995, Development of Computer-based Measurements and their Application to PD Pattern Analysis, IEEE Trans. Dielectrics and Electr. Insul, Vol. 2, No. 5.

Yong-Joo Kim, Jin-Bong Kim, Don-Ha Hwang, 1995, Novel Partial Discharge Measurement Technique for Generator Stator Windings, Korea-Japan Joint Conference, pp.111-115.

K. Mreuger, S. Oulski and H. Krivda, 1994, Current Method of Insulation Life Expectancy for Power Apparatus, T. IEE Japan, Vol. 114-A, No. 12.

황돈하, 김용주, 김진봉, 1997, 발전기 고정자 권선의 새로운 절연열화 판정 기준 설정에 관한 연구, 대한전기학회 하계 학술대회 논문집(E). pp.1692-1695.

E. Gulski and F. H. Kreuger, 1992, Computer-aided recognition of Discharge Sources, IEEE Trans. Electr. Insul, Vol. 27, No. 1.

E. Gulski, 1995, Digital Analysis of Partial Discharge, IEEE Trans. Dielectrics and Electr. Insul, Vol. 2, No. 5.

전력연구원, 1999, 발전기 고정자 기술 세미나, 한국전력공사. pp.10-11 pp.98-107.

황돈하, 김용주, 김진봉, 1996, 수력발전기 고정자 권선의 절연 수명평가 기준설정에 관한 연구, 대한전기학회 하계 학술대회 논문집(C). pp.1769-1773.

F. H. Kreuger, E. Gulski and A. Krivda, 1993, Classification of Partial Discharge, IEEE Trans. Electr. Insul, Vol. 28, No. 6.

전력연구원, 1997, 발전기 수명평가 진단 시스템 개발, 한국전력공사. pp.29-42, 213-295.

한국전력 정비기획실, 1997, 기술지원보고서, 한국전력공사.

感謝의 글

大學院 過程을 통하여 智慧의 근본은 하나님께 있으며 知識의 富饒함에는 인간의 능력으로 限界가 있음을 더욱 더 깨닫게 됩니다. 人間的으로나 學問的으로도 매우 貴重하고 有益한 2년 6개월 이었던 것을 回想해 봅니다.

國際學術심포지움 및 科學技術部 技術 諮問官 활동으로 정말 바쁘신 가운데에도 저의 작은 노력이 結實을 맺도록 指導해 주신 吳性寶 교수님께 감사함을 드립니다. 그리고 論文 審査를 통하여 많은 도움을 주신 左宗根 교수님, 李開明 교수님께 감사드리며, 學問的 깊이를 發展시켜 주신 金一煥 교수님과 金世鎬 교수님, 또한 연구차 美國에 가 계신 金豪贊 교수님께도 감사함을 드립니다.

본 論文의 試驗을 위해 바쁘신 가운데에도 협조해주신 韓國電力 李明訓, 金昌培님 께도 감사드리며 參考文獻과 資料들을 정리하여 보내주시고 깊은 관심을 보여주신 電力研究院 金熙東 博士님께 특별히 감사함을 드립니다. 아울러 본 論文資料를 정리하여 주신 강찬호 학생과 制御應用 세미나 활동에 함께 힘 기울였던 문상호 先生, 그리고 멀리 獨逸 유학중인 고근택 學兄에게도 고마움을 전합니다.

平生教育의 場에서 늦게나마 시작한 學位過程에 많은 激勵과 도움을 주신 주위 여러분들이 아니었다면 이 작은 結實은 어려웠으리라 생각됩니다. 아울러 犧牲과 忍耐로 內助해준 아내 朱貞淑, 그리고 손잡고 여유롭게 산책하면서 친구가 되어주지 못한 새하늘 昞日 새땅 昞坤에게도 미안함과 고마움을 함께 전합니다.

그동안 獻身的인 사랑으로 키워주시고 뒷바라지 해주신 故鄉에 계신 父母님과 生前에 따뜻한 보살핌으로 아껴주시던 丈母님의 靈前에 이 論文을 바칩니다.

黃 忠 九 드림