

# 回轉機의 運轉中 絶緣및 振動診斷技術

산업기술정보원 전자전기부장 김 능 수

설비의 대형화, 시스템의 고도화에 따라 機器마다의 중요성이 더욱 커져감에 따라 전동기 1대라도 고장이 나면 플랜트 전체 기능이 정지하는 사고로 될 가능성이 커져가고 있다. 이 때문에 최근에는 컴퓨터 등을 이용, 운전 및 보수업무의 효율을 높이고 예측하지 못한 사고를 미연에 방지하고 설비의 신뢰성 향상의 관점에서 예방보전, 예지보전을 위한 전동기의 診斷技術이 개발·실용화되어가고 있다. 여기서는 回轉機를 중심으로 運轉中捲線의 絶緣劣화와 振動에 의한 베어링 異常의 判定 방법에 대해 소개한다.

## 나. 絶緣劣화의 診斷方法

絶緣劣화의 현상은 <表 1>에서와 같이 외부로부터 관찰할 수 있는 범위의 것과 절연층 내부에서 직접적으로는 확인될 수 없는 것이 있다. 따라서 絶緣劣화의 診斷은 五感에 의한 診斷과 非破壞 絶緣試驗에 의한 방법으로 수행하고 있다.

또 고압전동기의 권선에 서치코일을 붙여 부분방전의 레벨과 밀도를 직접 검출하는 방법이나 전동기에서 외부케이블로 흐르는 부분방전전류의 레벨로부터 열화정도를 진단하는 방법 등도 있다.

## 1. 回轉機捲線の 絶緣劣화

### 가. 絶緣劣화 要因, 過程

電動機는 용도가 多岐하여 형식이나 정격, 절연 방식 등이 광범위하며, 또 부하의 상태라든가 주위조건도 여러가지여서 그 劣化形態는 각각 다르지만, 劣化要因은 크게 熱的, 電氣的, 機械的, 環境的으로 나뉘어져 복잡하게 작용하여 絶緣이 劣化되고 있다. 이를 劣化要因에 의해서 발생하는 현상을 정리하면 <表 1>과 같다.

## 2. 運轉中 絶緣診斷法の 種類

電動機와 發電機는 固定子코일의 구조가 거의 유사하기 때문에 絶緣診斷法도 공통적으로 취급할 수가 있다. 絶緣診斷法은 전기적 방법과 물리적 방법으로 나뉘어진다. 전기적 방법으로서서는 部分放電測定에 의한 방법이 일반적이나, 檢出回路와 센서에 따라 結合컨덴서法, 接地線電流檢出法 및 放射電磁界法의 3가지로 분류된다.

한편, 물리적 방법으로서서는 코로나음을 검출하는 초음파법, 고정자코일의 진동검출법, 발전기내의 가스를 모니터링하는 微粒子검출법이 있다. 이

외에도 전위변화검출법, 측색법이 있다.

部分放電測定에 의한 絶緣診斷法の 기술적 과제는 펄스검출용 센서의 개발과 외래 노이즈 제거 기술이지만 여기에 대해서는 많은 연구, 조사가 되

어지고 있기 때문에 여기서는 實機를 대상으로 한 진단법의 실용예를 소개한다. <표1, 2>는 각종 절연진단법중 운전중에 回轉機에의 적용항목(연구단계도 포함)을 抽出하여 보인 것이다.

〈表 1〉 絶緣의 劣化要因과 劣化現象

劣化要因		劣化現象
熱劣化	通常運轉 過負荷運轉	化學的變化에 의한 絶緣層의 열화 기포라든가 剝離의 生成 捲線端部나 口出케이블이 벌어짐 wedge의 이완
電壓劣化	常規對地電壓 서지電壓	部分放電에 의한 絶緣層 內部的 侵蝕 트래킹 트리임
機械的劣化	起動停止時의 電磁力 振動 冷熱사이클	絶緣層의 剝離라든가 龜裂 磨耗 捲線固定部라든가 支持材의 벌어짐
環境에 의한劣化	化學藥品 油 導電性汚損 吸濕·吸水	化學的變化에 의한 溶解 膨潤에 의한 剝離 溫熱에 의한 加水分解 트래킹 通風덕트의 구멍이 막혀 溫度가 上昇

〈表 2〉 運轉中 絶緣診斷法の 적용에

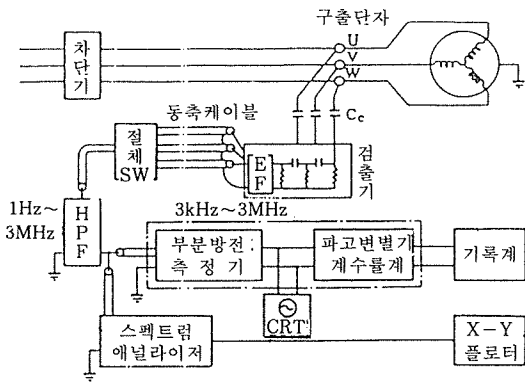
檢出方法			센서位置				中性点	附帶機器	本體接地線	回轉子	機內
			固定子 코 일								
			鐵心部	鐵心部外	接續線	高壓端					
電氣的方法	電荷法 部分放電	結合컨덴서法	-	○	○	○	-	-	-	-	
		接地線펄스檢出法	-	-	-	-	○	○	-	-	
		放射電磁界法	○	-	-	-	-	-	○	-	
	電位變化檢出法	○	-	-	-	-	-	-	-	-	
物理的方法	超音波法		○	-	-	-	-	-	-	-	
	卷線振動檢出法		-	○	-	-	-	-	-	-	
	微粒子檢出法		-	-	-	-	-	-	-	○	
	測色法		-	○	-	-	-	-	-	-	

○ : 適用例임(研究中인 것도 포함)

### 3. 運轉中 絶縁診断法の 實用例

#### 가. 部分放電 電荷法

근년 캐나다와 미국에서는 수차발전기의 고정자 코일의 電磁振動에 기인하는 슬롯放電(Vibration Sparking)에 의한 절연열화가 문제로 되고 있어, 이 방전의 검출법으로서 部分放電電荷法이 검토되고 있다. 한편, 운전중의 절연진단법은 회로의 분리나 복구작업이 필요없고, 課電用 電源裝置가 불필요하다는 이점이 있기 때문에, 日本에서도 슬롯放電의 검출 외에 절연진단의 간편화, 생력화를 목적으로 한 연구가 진행되고 있다.



(그림 1) 測定回路

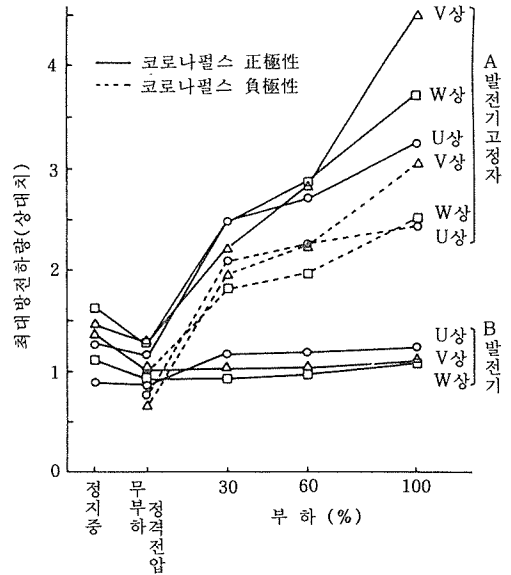
#### (나) 水車發電機의 部分放電 檢出

〈圖 3〉은 측정회로이다. 이 시스템에서는 라인측에 배치된 결합컨덴서의 저압측에 클립식 펄스센서를 삽입하여, 부분방전펄스를 검출하고 있다. 또 부분방전 펄스의 새로운 검출법으로서 課電中에 校正펄스를 주입해서 부분방전 펄스와 校正펄스를 동시에 비교하는 방법도 시도되고 있다.

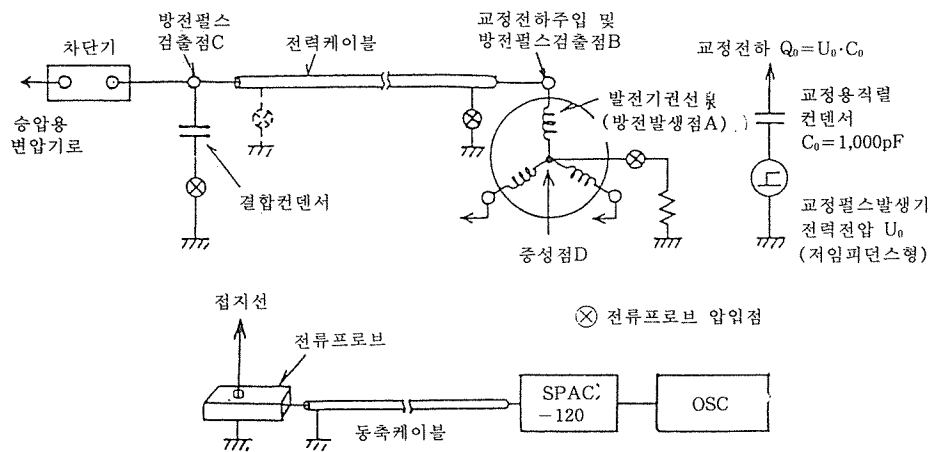
### (1) 結合컨덴서法

#### (가) 슬롯放電의 검출

슬롯放電이 발생하고 있는지 없는지를 조사하기 위해 〈圖 1〉과 같은 측정회로에 따라 수차발전기의 부하를 0%에서 100%까지 변화시켰을 때의 측정된 最大放電電荷量을 〈圖 2〉에 보였다. 固定子の 슬롯부 웨지(wedge)를 새것으로 바꾸기 전의 발전기(A)에서는 부하증가에 따라 최대방전전하량이 증대되어 電磁振動에 의한 슬롯放電의 발생이 예지되었다. 한편, 슬롯부 웨지를 새것으로 바꾼 발전기(B)에서는 최대방전전하량의 변화가 인지되지 않아 슬롯방전의 발생이 없음을 알 수 있다.



(그림 2) 負荷變化에 의한 放電의 變化



(그림 3) 發電機코일의 活線 部分放電 測定回路

(다) 電動機의 部分放電測定

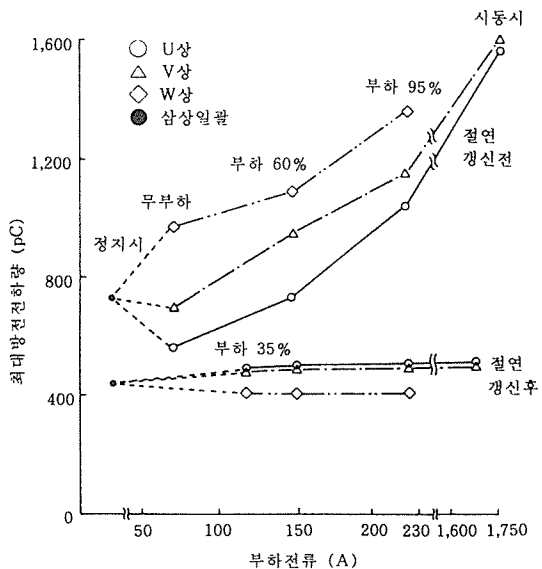
(그림 4)는 운전시간 약 8만시간의 화력발전소의 고압전동기에 대해 운전중 부분방전을 측정한 결과이다. 절연갱신 전과 후의 최대방전전하의 부하전류 의존성에 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 특

히 시동시의 최대방전전하량은 코일의 느슨함을 민감하게 반영하고 있어 코일 固定力 진단에 유효함을 알 수 있다. 運轉中 部分放電測定에서는 외래잡음의 제거가 중요하고 이것에 대해서는 平衡檢出法이나 位相게이트法 등 많은 검토가 되어 왔다. 전동기의 운전 중 부분방전측정에서는 傳搬펄스의 電流波形과 電壓波形의 비교로 放電펄스와 雜音펄스를 판별하는 방법이 제안되고 있다.

(2) 接地線 펄스檢出法

回轉機코일의 絶緣劣化라든가 損傷 및 도체의一部 斷線으로 部分放電이나 슬롯放電 혹은 아크放電이 발생하면, 高周波信號(放電펄스)가 코일도체를 傳搬하여, 固定子코일의 고압측 전력케이블의 접지선 및 중성점측 접지선 등에 나타나기 때문에 이것을 高周波 CT를 이용해서 검출하는 방법이다.

(그림 5)는 發電機코일의 素線斷線 등으로 스파크가 발생한 경우에, 중성점회로에 흐르는 고주파전류의 특정주파수를 감시하는 방법이다. 발전기의 고정자 코일은 對地정전용량을 통해서 중성

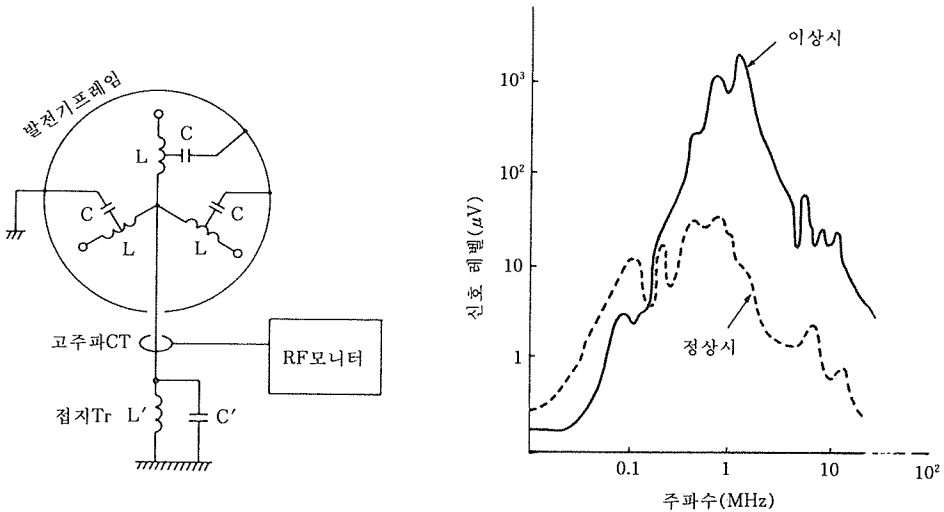


(그림 4) 運轉中 高壓電動機의 部分放電測定結果

점회로와 결합하고 있다. 회로의 공진주파수는  $L$ ,  $L'$ ,  $C$ ,  $C'$ 에 의해 결정되고 코일素線의 一部斷線이나 절연손상등인 경우는 중성점을 흐르는 공진 주파수 신호레벨이 증가한다. 신호레벨을 중성점 회로에 삽입한 고주파 CT로 감시하여 異常을 검출하는 것이다. 모니터의 감시가능 주파수대역은 100KHz~3MHz로서, 감시정확도를 높이기 위해

임의로 3点的 주파수를 동시에 감시할 수 있게 하고 있다.

똑같이 回轉機의 고정자코일 중성점에 고주파 CT를 설치하고, 코일도체를 運搬해 가는 10KHz~32MHz의 고주파 전류 혹은 고주파 전압을 측정하는 방법도 있다. 이 방법은 특히 아크방전의 검출에 적합하다.



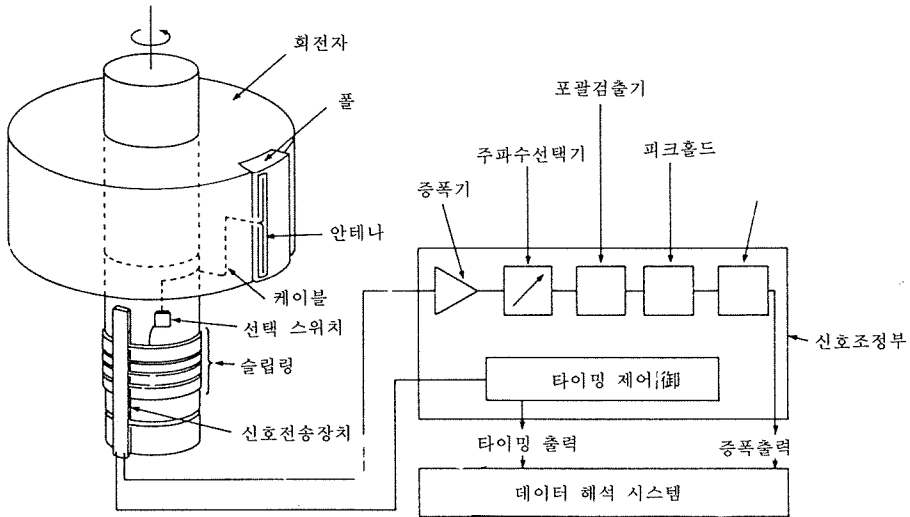
(그림 5) RF모니터 원리그림

또 고압전동기의 급전용 케이블에 설치한 펄스 검출 CT와, 모선과 對地間에 설치한 결합컨덴서의 저압측에 삽입한 펄스검출 CT로부터 얻어진 2개의 출력신호의 위상차를 검출함으로써, 부분방전을 일으키고 있는 계통의 전동기를 판별할 수 있도록 한 방법도 보고되고 있다.

### (3) 放射電磁界法

部分放電에 의한 放射電磁界를 回轉機가 정지하

고 있는 동안에 측정하는 방법은 오래전부터 검토되어 왔지만, 여기서는 회전자에 안테나를 탑재하여 운전중에 측정하는 방법을 소개한다. <그림 6>은 본 방식의 일예이다. 안테나에 포착된 部分放電信號는 슬립링을 통해 信號處理프로세서, 解析裝置로 전송된다. 잡음대책이 확립되면 고정자코일의 절연상태를 운전중에 평가하는 유력한 방법이 될 것이다.

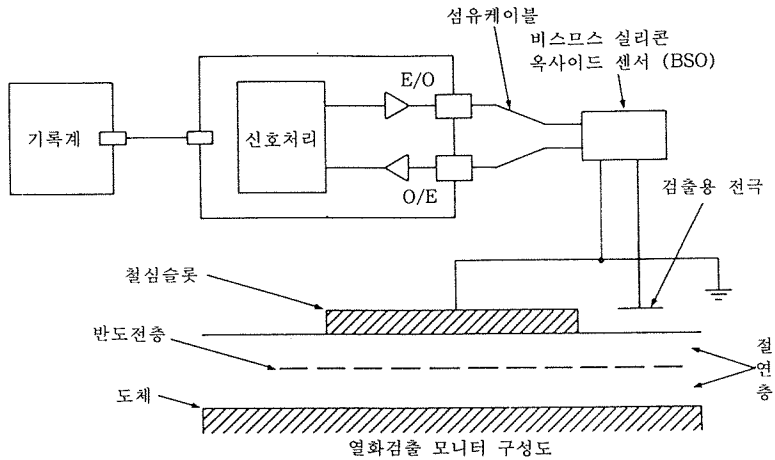


(그림 6) 回轉子에 탑재된 部分放電 모니터시스템

### 나. 電位變化 檢출법

코일 絶緣層內의 전위변화를 측정함에 따라 劣化의 進전상황을 檢출하는 방법으로 그 모니터 구성은 <그림 8>과 같다. 실제로는 부분적인 절연과괴가 반도체층 부분까지 도달했을 때 일어나는 電位變化를, 코일절연층내에 설치한 劣化檢出센서로

한 半導體層, 低壓側電極端의 絶緣層上에 설치한 檢출용 전극 및 비스무스 실리콘 옥사이드(BSO) 소자를 이용한 광학측정계를 이용해서 檢출한다. 부분방전에 따라 절연열화가 일어나, 도체-반도체층간의 절연이 파괴되면 電位가 스텝狀으로 크게 변화하므로 劣化되어가는 것을 알 수 있다. 이 방법은 광학측정계를 이용하고 있기 때문에 노이즈의 영향을 받지 않는 특징이 있다.



(그림 7) 내부 半導體層에 의한 電位檢出

#### 다. 超音波法

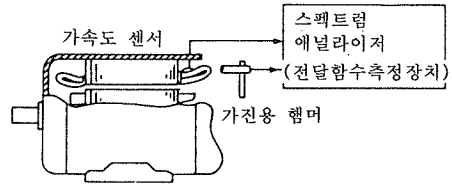
이 방법은 GIS나 유입변압기에 활용되고 있지만 回轉機분야에서도 부분방전의 검출에 超音波센서 이용의 연구가 시도되고 있다. 아스팔트 마이크절연에서는 음의 감쇠가 커서 現地 측정에는 부적합하나, 감쇠가 작은 최근의 합성수지 마이크절연에서는 유효한 수단이 될 가능성이 있다.

코일절연층의 외측(슬롯내)에서 부분방전이 발생하고 있는 수차발전기에 대해, 초음파 마이크로폰을 이용하여 마이크로폰으로부터 코로나음을 검출하는 사례도 있다. 코로나음의 레벨과 코일절거 후에 측정된 최대방전레벨 및 코일표면의 열화부위 등이 상대적으로 일치하고 있어 코로나음을 측정하면 최대방전 전하값을 검출할 수 있음을 알 수 있다. 이 방법은 안전성이 높아 수차발전기의 절연특성 관리에 적합하다.

#### 라. 振動檢出法

回轉機코일의 진동해석에 의한 진단법은 絶緣材料의 劣化에 의한 絶緣層의 이완정도를 정량적으로 검지해서 절연의 劣化도를 판정하는 방법이다. 回轉機코일의 절연층이 劣化되면 절연층 내의 접착력이 저하하고, 운전중에 熱應力·電磁力·振動 등의 기계적 스트레스에 의해 박리되고, 균열된다. 즉 劣化에 의해서 절연층의 긴밀성이 저하하게 된다. 이 열화상황은 코일이 加振했을 때 발생하는 진동특성으로 반영되기 때문에 振動加速度·振動速度·振動變位 혹은 음 등을 계측·해석함으로써 감쇠비나 전달함수 혹은 고유진동수의 변화를 포착, 劣化도를 판정할 수 있다. 이 방법은 온도범위가 넓게 적용될 수 있고 Tan  $\delta$ 라든가 절연저항과 같

이 吸溫의 영향을 적게 받는 특징이 있다. (그림 8)은 진동해석법의 측정개념도이다.



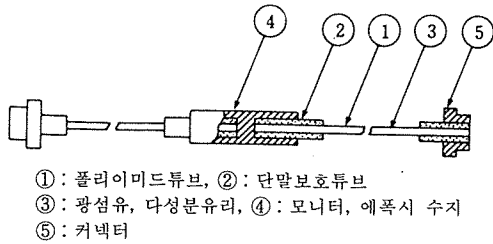
(그림 8) 振動解析法の 測定概念그림

#### 마. 微粒子檢出法

回轉機가 국소적으로 과열되면, 절연물 등 유기 물질분이 熱分解되어 微粒子를 발생한다. 微粒子檢出法은 이 微粒子를 검출함으로써 回轉機內의 異常過熱을 조기에 발견하는 것이다. 이 방법은 機內의 가스를 분석하는 방법이므로 수소생각 터빈발전기에 적용되고 있다. 이 방법은 국부과열이 발생된 곳을 알 수 없든가, 장소가 좁아 통상의 센서를 부착할 수 없는 경우에 유효한 것이다.

#### 바. 測色法

回轉機의 절연진단법으로서 測色法, 熱重量測定法, 赤外線分光分析法 등 물리화학적 시험에 의한 방법도 있다. 이것들은 색의 변화나 분석 등의 방법으로 절연재료를 직접 조사 분석하여 熱劣化 정도를 판정하는 방법이기 때문에 劣化의 본질적인 정보를 얻을 수 있고, 또 아주 좁은 영역에서도 판정할 수 있는 것이 특징이다. 이들 방법 중 測色法은 현장에서 非破壞測定이 가능하여 運轉中 診斷이 가능한 방법으로 제안되고 있다.



(그림 9) 測色센서의 構造

回轉機의 구체적 절연감시를 위해 적용되는 測色센서로서 (그림 9)와 같은 것이 개발되고 있다. 이 센서는 光纖維를 同軸上에서 對向시키고 그 사이에 에폭시 樹脂를 충전한 것으로 이 센서를 回轉機의 코일 속에 집어넣고 熱劣化에 의한 에폭시 樹脂의 변색에 따라 절연감시를 하는 것이다.

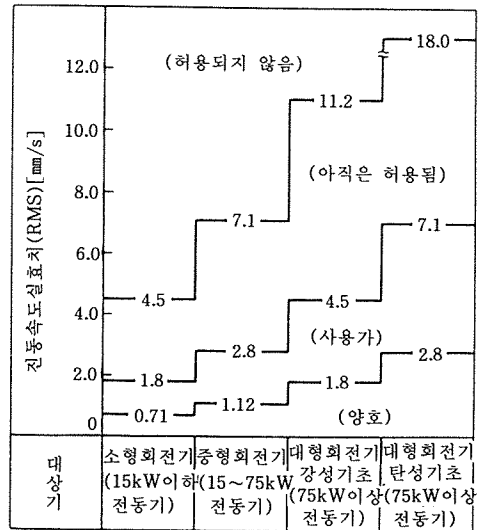
#### 4. 振動에 의한 베어링의 劣化判定

베어링의 진동레벨에 의한 劣化판정에는 다음과 같은 3가지 방법이 있다.

##### (1) 絶對值 判定法

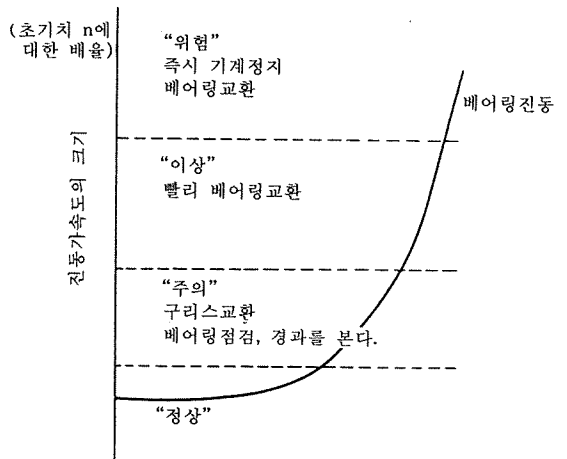
이 방법은 베어링의 良否진동의 絶대치로 판단하는 기준치를 미리 결정해 놓고, 그 값과 판정치와를 비교하여 판정하는 것이다. 기준치로서는 ISO에서 진동속도에 대해 권장하고 있기 때문에 (그림 10)에 소개했다. 베어링이 손상을 입을 경우의 진동주파수는 수KHz에서 수십 KH로 높아, 진동가속도(G)로 측정되고 있지만, 진동가속도에 대해 정해놓은 기준치는 없다.

##### (2) 相對值 判定方法



(그림 10) ISO 2372에 의한 판정기준

이 방법은 정상시의 값을 초기치로 하고, 그 후의 측정데이터의 초기치에 대한 培率로부터 劣化를 판정하는 것으로 널리 채용되고 있다(그림 11) 참조). 이 방법에서는 초기치의 신뢰성이 가장 중요하고 필요에 따라 수정할 필요가 있다.



(그림 11) 相對值 判定例



### (3) 相互레벨 판정방법

이 방법은 동일 사양으로 제작되고 동일 조건에서 운전되고 있는 다른 전동기의 진동레벨과 相互 비교하는 방법으로서 측정치에 2배 이상의 차이가 있으면 異常 가능성이 높다.

### 나. 振動周波數와 異常原因

振動周波數로부터도 異常原因의 豫상이 가능하고 개개의 원인을 구별하기 위해 振動周波數分析이 유효하다. <表 4>에 주요 異常原因과 振動周波數를 보였다.

## 5. 베어링의 異常原因 推定

베어링으로부터 발생하는 振動의 方向, 周波數, 波形 등으로부터 異常原因을 추정하는 방법은 아래와 같다.

### 가. 振動方向과 異常原因

<表 3>에 주요 異常原因과 振動方向을 보였다. 이와 같이 異常原因에 따라서는 振動方向이 다르기 때문에 振動에 의한 診斷에서는 軸方向, 鉛直方向, 水平方向의 3방향에 대해서 측정한다. 단, 振動周波數가 높은 경우는 방향성이 적기 때문에 한쪽 방향으로만 한정하는 것이 가능하다.

## 6. 맺는말

이상, 回轉機의 運轉中 絶緣診斷技術의 적용상황에 대해 소개했다. 運轉中 絶緣診斷技術은, 1) 絶緣劣化 혹은 異常에 의해 발생하는 현상이나 특성의 변화를 검출하는 기술, 2) 檢出한 量과 劣化度, 잔여수명 등과의 관계를 명확히 해놓고 합리적인 劣化·異常판정기술을 작성할 것, 3) 경제성과 신뢰성을 만족하는 실용적인 診斷시스템을 구축하는 기술이다. 이들 기술 중 몇가지 예는 이미 현장에 적용되어 회전기의 신뢰성 확보에 기여하고 있기 때문에 실제로 회전기의 보수·점검, 설비 계획에 관계되는 분야에는 참고가 될 것으로 사료된다.

<表 3> 振動方向과 異常現象

測定對象	異常原因	振動方向
굴림베어링	內輪損傷	H, V
	外輪損傷	H, V
	轉動體損傷	H, V
미끄럼베어링	metal gap大	H, V
	油潤滑不良	H, V
	oil whip	H, V
커플링	面떨림	A
	偏心	H, V
基礎	레벨不良	A
	軟弱	A

〈表 4〉 振動周波數와 異常原因

異常原因	振動周波數	備考
굴림베어링 內輪損傷	$\frac{n \cdot m}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha\right) f_0$	$f_0$ : 回轉周波數 $n$ : (1, 2, 3...) $m$ : 베어링의 볼 수 $d$ : 베어링의 볼 직경 $D$ : 베어링피치원 직경 $\alpha$ : 베어링 接觸角
굴림베어링 外輪損傷	$\frac{n \cdot m}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha\right) f_0$	
굴림베어링 轉動體損傷	$\frac{n \cdot m}{2} \left(1 - \frac{d^2}{D^2} \cos^2 \alpha\right) f_0$	
미스얼라이먼트	$f_0, 2f_0, 3f_0$	

## '96서울국제종합기기전(SIEF '96) 참가 안내

- ▶ 전 시 기 간 : '96. 5. 20(월)~5. 24(금) [5일간]
- ▶ 장 소 : 한국종합전시장(KOEX) 별관
- ▶ 전 시 규 모 : 9,098S/M
- ▶ 주 최 : 통상산업부
- ▶ 주 관 : 한국전기공업진흥회, 대한무역투자진흥공사, 한국종합전시장
- ▶ 전시대상품목 : 전원용 전기기기, 산업용 전기기기, 전력제어시스템, 가정용 전기기기, 조명기구, 기타전기기기
- ▶ 신 청 기 간 : '96. 3. 31까지
- ▶ 참 가 비 용

구 분	국 내 업 체	해 외 업 체	비 고
독 립 부 스	₩ 990,000/부스	US\$ 1,800/부스	VAT 별도
조 립 부 스	₩ 1,305,000/부스	US\$ 2,250/부스	

### ▶ 참가문의 및 접수처

- 한국전기공업진흥회 TEL : 424-4901
- 한국 종합 전 시 장 TEL : 551-1146
- 대한무역투자진흥공사 TEL : 551-4412