

이제는 전력선 기술이다(3)

“전력 신호를 보면 기기의 상태가 보인다”



정재천 공학박사
한국전력기술(주)
원자로설계개발단

1. 지구를 지키는 기술

올여름이 기상 관측사상 가장 더울 것이라는 영국 기상학자의 예측은 긴 장마로 인해 그리 유효하진 않았지만 이제 우리나라도 한여름 40도에 육박하는 지역이 나오고 있는 것으로 봐서는 이 학자의 의견을 전적으로 무시할 것도 아닌 것 같다.

기상학자들이 진단한 바에 따르면, 각종 자동차의 연료와 난방유의 연소 과정에서 배출된 가스들이 도시 상공에 머물면서 일종의 열(熱)섬 현상을 일으켜 무척 더운 여름과 겨울답지 않은 겨울이 반복된다는 것이다.

인간은 자연을 파괴하고 자연은 인간의 생존을 방해하는 끊임없는 악순환의 고리에 빠져든 것은 아닌지, 자연의 자정능력에 따른 역습이 공포로 다가온다.

한겨울 한강의 얼음을 잘라서 한여름 화채에 띄웠던 선조들의 이야기는 호랑이 담배 피우던 시절의 전설이 되어 버렸고, 한겨울에도 눈을 구경하기 힘들니 냉장고 없이도 여름철 얼음을 즐겼던 선조들의

지혜를 되살리기 위해서는 인간의 자원 절약과 친환경적인 기술의 개발이 절대적으로 필요하지 않을까? 그래서 이번 호에는 전력선 신호분석 기술의 또 다른 장점인 자원 절약의 측면을 강조하면서 시작하고자 한다.

걷기 운동과 관련한 기사가 거의 매일 게재되어도 자동차를 이용하지 않는 우리의 생활은 상상할 수도 없으니, 새로운 자원 절약과 환경 보호거리를 찾을 수 밖에. 자, 우리의 눈을 모터로 돌려보도록 하자. 최근 하이브리드 자동차가 본격적으로 활성화 되고 있다. 이 새로운 자동차는 하이브리드라는 단어가 주는 느낌에서도 알 수 있듯이 기존의 자동차 기술을 완전히 대체하는 것은 아니다. 기름을 연소하는 엔진과는 별도로 모터와 연료전지를 달고 다니며 연비는 기존 자동차의 배 이상인 환경 친화적인 자동차이다. 이처럼 모터는 가정과 산업체에서 필수 불가결한 동력원이 되었다. 그렇다면 환경 보호거리를 이 모터에서 찾아보면 어떠할까? 다음의 내용에 주목해 보자.

우리나라 전체 에너지의 20퍼센트를 소모하는 주 소비처는 바로 모터이다. 또한 전체 전기 에너지의 67%정도가 모터에서 소비된다. 미국의 조사 결과, 산업체에 설치된 모터는 평균 67%의 효율로 운전되고 있는 것으로 조사되고 있으며 국내 모터의 경우도 이와 유사한 효율을 보일 것으로 판단된다. 이 수치를 이용하여 어느 정도의 전기가 올바르게 사용되지 못하고 있는지를 계산하면 다음과 같다.

우리나라 발전 설비 용량 (가정) : 66,670,000 kW

- 전기 낭비량 : $66,670,000\text{kW} \times 67\% \times 40\% = 17,867,000\text{kW}$

즉, 26.8%의 전기가 모터에서 올바르게 쓰이지 못하고 있으며 이는 1,000Mw급 신형 원자력발전소 17에 해당하는 엄청난 용량이다.

좀 더 실감나게 표현하기 위해 2006년 전기 소비량을 기준으로 한 전기 요금을 계산해 보면 다음과 같다.

2006년 한전 전기판매수익 : 26,659,134,174,816원

2006년 모터에서 낭비된 전기요금 : 7,144,647,958,850원

($26,659,134,174,816\text{원} \times 67\% \times 40\%$)

이와 같이, 모터를 잘 관리하고 운영하면 전기 소비를 획기적으로 줄일 수 있다. 그렇다면 전기 소비를 줄이는 것과 환경보호와는 어떠한 상관관계가 있을까? 우리나라는 화력발전소와 원자력발전소에서 전체 발전량의 50%정도씩을 생산한다. 문제는 화력발전소다. 만일 전기만을 충전해서 움직이는 자동차가 일반화 된다고 해도 교토협약에 의한 이산화탄소 배출량 규제는 피해 나갈 수 없다. 바로 화석연료를 태우는 화력발전소 때문이다. 즉, 무조건 전기사용량을 줄이는 것만이 이산화탄소 문제를 원천적으로 해결하는 지름길이지만 문제는 전기사용 자체를 줄이기는 거의 불가능 하다는데 우리의 딜레마가 있다. 원자력발전은 온실가스 발생이 없다. 물론, 방사선 피폭과 방사성 폐기물 처리라는 고약한 꼬리가 달려있기는 하지만 말이다.

자 그럼, 자원 절약과 친환경적인 기술이 되도

록 노력하는 전력선 신호분석 기술의 내면을 살펴보자.

2. 새로운 패러다임을 위한 기술

전기, 전자공학과 기계공학은 메카트로닉스로 서로 만나고 있다. 종래의 전통적인 단위 공학의 개념이 바뀌고 있는 것이다.

회전기기의 구동원도 고등 제어계를 이용한 설비가 산업현장에 도입되면서 가변 주파수 방식 및 벡터 방식의 인버터를 이용한 구동방식의 기기가 점점 늘어나고 있다. 일선 현장 기술자에 의하면 나라 경제가 발전하면서 대형기기 보다는 중소형 기기, 단순한 일을 반복하는 기기 보다는 컴퓨터와 연동되는 기능을 가진 기기로 회전기기의 패러다임이 바뀌고 있다고 한다. 따라서 제어의 대상도 단순히 속도를 변화시키는 방법에서 위치와 토크를 제어하는 방식으로 변화되고, 제

어방식 역시 저항이나 권선비를 바꾸는 방법에서 전압, 전류 및 주파수를 제어하는 회전기기의 고도화가 일어나고 있다.

아울러 기기의 동작도 종래의 정속 운전에서 프로그램 운전으로 바뀌게 되므로 이와 같은 기기의 상태를 감시하고 분석하는 방법에도 변화가 요구된다.

종래의 센서에 의한 진동감시장치(VMS, Vibration Monitoring System)는 진동을 직접 측정하는 매우 좋은 기법으로서 대형 기계의 상태를 측정하는 최적의 방식으로 사용되어 왔다. 하지만 기기가 소형화, 고도화 됨에 따라 센서를 몸체에 설치해 사용하는 센서 방식은 활용도가 점점 줄어들고 있으며, 센서를 설치하지 않는 방법이 필요해 지고 있다.

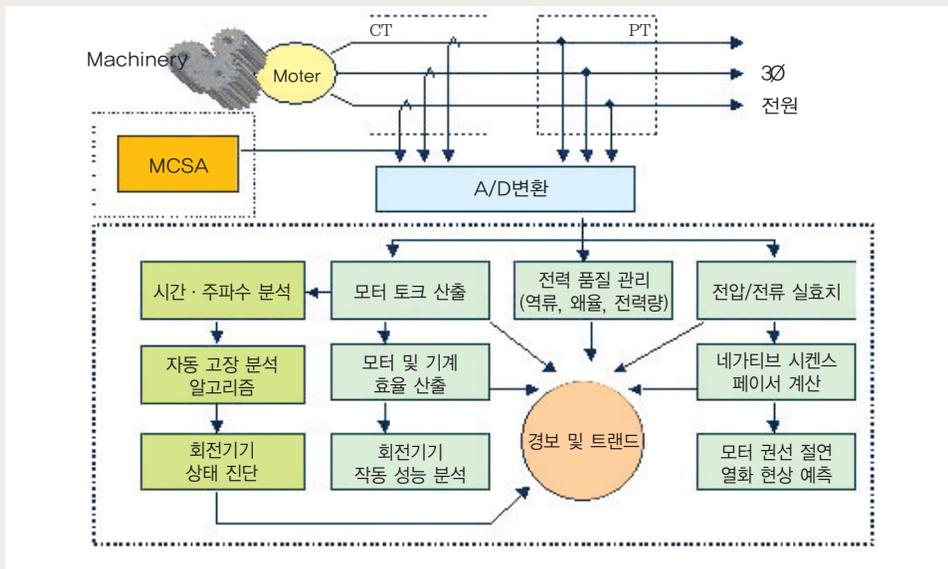
예를 들어 최신의 공장 기계의 경우 1대의 공장 기계는 6축을 기본으로 움직이므로 6대의 소형 서보 모터로 제어되고, 모터 1대의 운전 주기는

대부분 60초를 넘지 않는다. 따라서 기존의 진동 감시 설비로는 효율적인 감시가 불가능하다.

이러한 변화에 따라 새로운 방법인 모터 전류 신호분석기법(MCSA, Motor Signature Analysis)이 도입되어 사용되고 있다. MCSA 기법은 간편성은 있으나 큰 신호에 섞인 미세한 신호를 다루게 되므로 측정의 정밀도가 낮고, 이에 따라 자동화할 수 없는 본질적인 약점을 지니고 있다. 이를 보완하기 위해 전력선 신호분석 기법은 MCSA의 간편성과 경제성을 유지하면서 자동화가 가능하도록 하는데 목표를 설정하고 개발되었다.

3. 전력선 신호분석 기술, 무엇이 다른가

그림 1과 같이 본 기술은 기기 상태 진단의 정확도를 기하기 위해 시간-주파수축 감시 기법을 사용한다. 또한 전동기에 공급되는 전류와 전압 성



[그림 1] 전력선 신호분석 기술 개요도

분만을 이용하여 모터가 발생하는 토크를 구한 후, 각종 동력 전달 손실을 고려하여 기기의 성능을 진단한다.

이외에도 모터 내부의 자계 회전으로부터 권선 열화에 대한 정보를 추출, 권선을 진단하고 아울러 전력 품질을 측정하여 기기의 손상 여부를 다양하게 진단하는 기능을 가진다. 수집된 각종 정보들은 경보와 트렌드 작성을 위한 입력으로 사용되며, 규칙기반(Rule-based) 판단 알고리즘을 거쳐 최종적인 기기의 상태와 성능 지표로 출력하는 기능을 가지고 있다.

기기의 성능과 상태 진단에 규칙 기반의 다변수 판별법을 사용하는 이유는 모터의 전류, 전압 성분에 섞여있는 고장의 징후가 60Hz 전원 주파수보다 너무나 미약하기 때문이다.

따라서 신호처리를 담당하는 각종 하드웨어 역시 적어도 100dB이상의 대역폭을 갖고 충분한 해상도를 보유하도록 하고 있으며 전류, 전압 신호 샘플링도 동기가 맞도록 하고 있다.

4. 회전기기의 주요 손상 원인

본격적인 진단 기법 소개에 앞서, 회전기기의 주요 손상 원인과 진단방법을 간단히 살펴보자.

표 1은 회전기기의 손상 내용에 따라 발생하는 진동 특성을 정리한 것이다. 회전기기의 각 부분에 손상이 발생되면 전동기에는 각종 진동이 전달된다. 또한 전동기 자체의 고장은 전기, 자기적 불평형을 일으켜 전원 주파수를 왜곡시키므로 기계적 진동도 발생시킨다.

진동은 손상의 종류에 따라 형태를 달리하게 되는데 각각 다른 형태의 진동을 분석하는 방법은 원시시대부터 있어 왔으니, 바로 고인돌시대의 사냥에서부터 었을 것이다. 맘모스 뼈를 쫓아 사냥을 하는 원시인들에게 맘모스의 수와 거리를 알아내는 것보다 중요한 일은 없었을 것이다. 땅에 귀를 대고 가만히 들어보면 달리는 맘모스의 진동이 실시간으로 전달될 테니 말이다. 영화 “내

〈표 1〉 회전기기 주요 손상 원인 분석

손상내용	손상에 따른 진동 특성	진단 방법
회전체 불평형	<ul style="list-style-type: none"> 회전체 회전속도와 동기(1X) 성분이 지배적 진동의 진폭은 불평형량과 회전속도에 비례 진동벡터의 위상지연각은 회전속도의 함수 	동기 주파수 분석
회전체축 장력불량	<ul style="list-style-type: none"> 베어링의 비선형적운동은 진동파형을 왜곡 저차수성분(2X, 3X)의 반경방향 진동 증가 	저차수 주파수 분석 시간축 분석
회전축 휨	<ul style="list-style-type: none"> 질량불평형에 의한 주파수특성 차이점 발생 	특성주파수 분석
마찰	<ul style="list-style-type: none"> 진동신호의 응답특성이 증가 및 특정 부분의 온도상승 축 회전속도 감소 	회전속도 변화 분석
오일 휠 및 휠에 의한 불안정	<ul style="list-style-type: none"> 회전속도의 0.5배 이하 주파수는 성분의 진동을 발생 	주파수 변화 분석
축균열	<ul style="list-style-type: none"> 1X성분의 진동 증가 	특성 주파수 분석
베어링 결함	<ul style="list-style-type: none"> 베어링의 결함특성, 기하학적 구조들에 따른 특성 주파수 변화 	특성 주파수 분석

일을 향해 쏘라” 에서도 로버트 레드포드와 폴뉴먼이 열차를 폭파하여 돈을 강탈하는 장면이 나오는데 이때 주인공들이 사용하는 기차의 거리 측정법 역시 철도에 귀를 대고 달리는 기차의 진동을 감지하는 방법이였다.

어쨌든, 진동 감시 방법만큼 오래된 감시법도 드물다는 것은 이해하셨을 테니 위의 표 1을 자세히 살펴보자. 표에 나타난 바와 같이 진동을 감시하는 방법은 크게 시간축에서 분석하는 방법과 주파수축에서 분석하는 방법, 그리고 주파수의 시간에 따른 변화를 살펴보는 시간-주파수축 분석 방법으로 나눌 수 있다.

5. 시간축 진단방법과 주파수축 분석 방법

시간축 분석방법은 시간에 따른 신호의 변화를 자세히 살펴보는 것으로서 진동 센서에 의해 취득된 신호를 사용하거나, 전압과 전류를 측정하여 직접 분석하거나, 전력과 토크 등으로 변환하여 신호가 매 주기동안 어떻게 변화하는지를 분석한다.

주파수 분석은 시간에 따른 신호의 진동 주기를 가지고 분석하는 방법으로서, 회전주파수의 배수만을 분석하는 차수 분석(Order Analysis)과 특성 주파수를 분석하는 방법을 많이 사용한다.

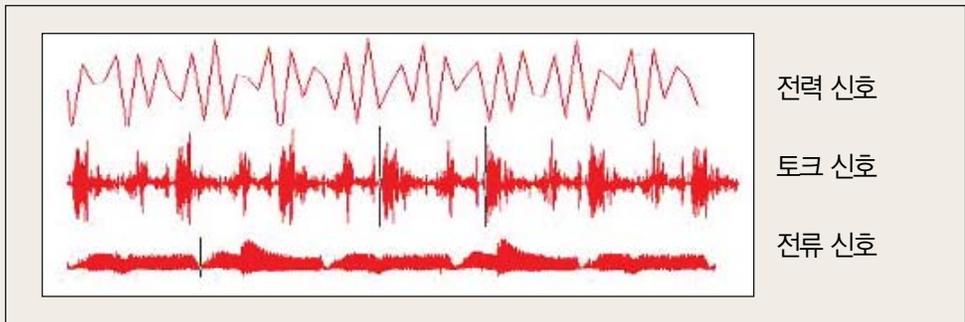
가. 시간축에서 회전기기 비정상 상태를 예측하는 방법

기계설비 및 전동기 고장에 의한 전류, 전압, 전력 및 토크의 변화 추이를 연속적으로 감시하면 고장 부분과 고장 정도의 판별이 가능하다.

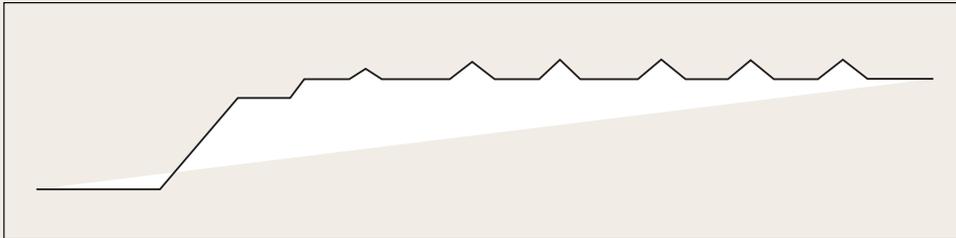
[그림 2]와 같이 모든 전기 신호는 같은 주기를 가지며 비정상 상태시 에도 같은 주기로 맥놀이함을 알 수 있다. 그러므로 전압, 전류, 전력 및 토크의 주기적 특성을 분석하면, 기기의 상태를 진단할 수 있다.

[그림 3]은 모터 구동벨브(MOV)의 워프 워기어에 의해 구동되는 기계의 치차가 마모 또는 상실 되었을 때 토크가 어떻게 변화하는가를 시간축에서 연속적으로 나타낸 파형이다. 최대 토크와 최소 토크의 변화율을 관찰하여 고장 형태를 판별하며 아울러 주기를 분석하여 고장 정도를 예측할 수 있다.

시간축 신호처리 분석기법으로는 실효값과 첨두값의 비를 이용하는 Crest Factor, 파형의 상관관계를 구하는 Cross Correlation, 그리고 2개의 위치에서 진동의 유사성을 결정하는 방법인 Coherence 분석 기법 등이 주로 사용된다.



[그림 2] 시간축에서 측정된 전기 신호의 주기성(축정렬 불량시 파형)



[그림 3] 시간축에서 측정된 전기 신호의 주기성(측정렬 불량시 파형)

〈표 2〉 시간축 예측기법의 판정기준

비정상 상태	판정 기준	비 고
전압 불평형	5%	운전정지
전류 불평형	5%	운전정지
고주파 왜음	5% 3%	600V이하 저압 600V이하 고압
토크 불평형	10%	정밀점검
상임피턴스 불평형	8% 12%	주의 알람

주 : IEEE 519-1992 및 NEMA MG-1권고값

〈표 2〉는 측정된 각종 값들이 시간에 따라 변화하는 율을 계산하여 기기의 비정상 상태를 결정하는 방법을 보여준다. 본 판정기준은 IEEE 519-1992 및 NEMA MG-1에서 권고한 값을 사용한다.

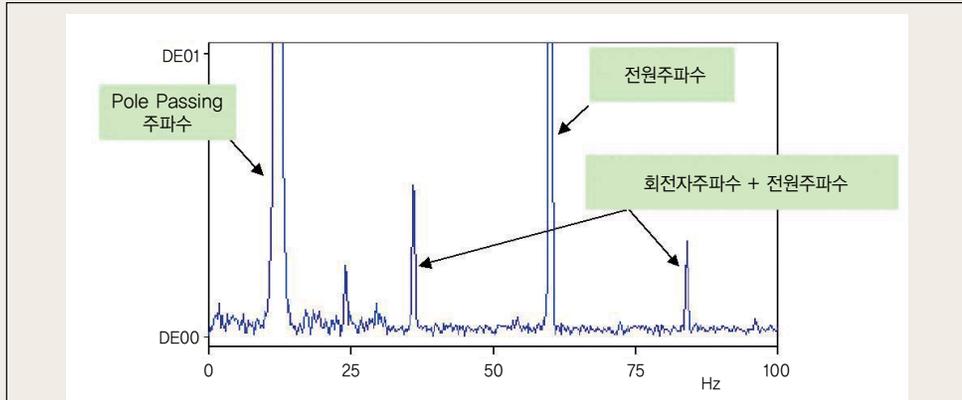
나. 주파수축에서 회전기기 비정상 상태를 예측하는 방법

회전기기의 기계적인 고장이 발생하면 전동기에 진동이 전달되고 전동기는 공극의 불균형을 일으켜 자계를 불평형하게 하여 특성 고조파를 전원 주파수에 중첩 시킨다. 또한 모터 자체의 기

계적, 전기적 고장이 발생하였을 경우에도 자계 분포를 변화시켜 특성 고조파를 발생시킨다.

주파수축에서 회전기기의 비정상 상태를 예측하는 기법은 바로 전류, 전압, 전력, 토크 신호를 주파수축으로 변환한 후 그림 4와 같이 특성 주파수 성분을 검색하는 방법을 이용하는 것이다.

회전기기의 비정상 상태를 감시하는데 가장 중요한 요소는 회전자의 속도를 측정하는 것이다. 이는 유도전동기의 경우 회전자 속도가 축에 인가된 부하에 의해 미끄러지는 슬립(Slip)이 발생하는데, 특성 주파수는 회전자와 고정자 자계가



[그림 4] 전류 FFT를 통해 분석한 전원 주파수와 특성 주파수

<표 3> 주파수축 분석 기법의 특성 주파수 및 비정상 상태 판정기준

비정상 상태	특성 주파수 추출	분석 방법	판정기준 ($f_e - f_p$)	조치내용
측편심(동적상태)	$f_{ecc-dm} = f_e [1 \pm k = (\frac{1-s}{p} \cdot)]$	• 전류파형분석 • 특이 주파수추출 • If-Then Logic Rule 에 의한 자동진단	>60dB	없음
회전자 불량	$f_{rot} = f_e [K(\frac{1-s}{p}) \pm s]$		50~60dB	간헐 감시
고정자불량	$f_{fixor} = (1-2S \cdot n) f_e$		40~50dB	연속감시
전동기회전 주파수	$f_{rotor} = S \cdot n \cdot f_{line}$		30~40dB	진동분석 시험실시
베어링 결함	$f_i = \frac{n}{2} \cdot f_m [1 + \frac{BD}{PD} \cos \beta]$		<30dB	정기보수

주: 판정기준은 미국 P/PM Technology Magazine 추천기법임

서로 반응하여 나타나므로 회전자 속도를 정확히 측정하느냐의 여부는 이 방법의 정확도를 결정하는 가장 중요한 변수이다.

표3에는 회전기와 모터의 동적 측편심, 모터

의 회전자 불량 또는 고정자 불량, 회전자 주파수, 그리고 베어링 내륜 결함시의 특성 주파수를 계산하는 공식을 수록하였다. 표 3의 우측 부분은 고장 판정 기준을 나타낸다.

이 기준은, 지금은 발간되지 않는 미국의 P/PM 잡지에 수록되었던 추천기준으로서 EMPATH, PDMA, BAKER 사등 미국의 MCSA 장비 제조업체들이 판정 기준으로 삼고 있기도 하다.

판정 방법은 특성 주파수를 계산한 후 계산된 대역에 FFT 파형이 특성 주파수를 보이고 있는지 여부를 판별한 후, 전원 주파수와 특성 주파수 간 데시벨 차가 30dB 미만이면 정기 보수에 들어가 정밀 점검하는 방법을 사용한다. 그러나 이 기준은 모든 모터구동 기기에 맞는 것은 아니므로 모터와 회전기기가 최적인 상태에서 측정된 기준값을 보정하는 경험적인 기법의 추가가 필요하다.

다. 시간-주파수축에서 회전기기 비정상 상태를 예측하는 방법

[그림 3]의 전류 FFT는 짧은 시간 동안의 신호를 추출하여 주기적 신호를 표기한 것으로서 신호가 시간에 따라 변화하면 특성 주파수를 판별하기가 곤란해진다. 또한 두 개 이상의 서로 다른 신호가 동일한 주파수 성분의 스펙트럼을 가지는 경우 이들 각각을 특성화시키기가 어렵다.

따라서 각 신호성분의 스펙트럼을 시간의 추이에 따라 표현할 수 있는 신호처리 방법이 개발되었으며, 이는 시간, 주파수 및 크기에 대한 추이를 하나의 현상으로 표현함으로써 신호해석의 영역에서 획기적인 전환점이 되었다.

신호의 시간-주파수 분석(Time-Frequency Representation, TFR) 방법들은 많이 있지만, 주로 많이 사용되고 있는 것으로는 Instantaneous Frequency, Short-time Fourier transform, Wavelet transform, Wigner distribution 등이 있다.

Instantaneous Frequency 는 시간에 따른 주파수의 진동 특성을 관찰하기 용이하며 시간에 따른 신호의 변화량을 감시할 수 있으나 잡음에 매우 민감한 반응을 보인다.

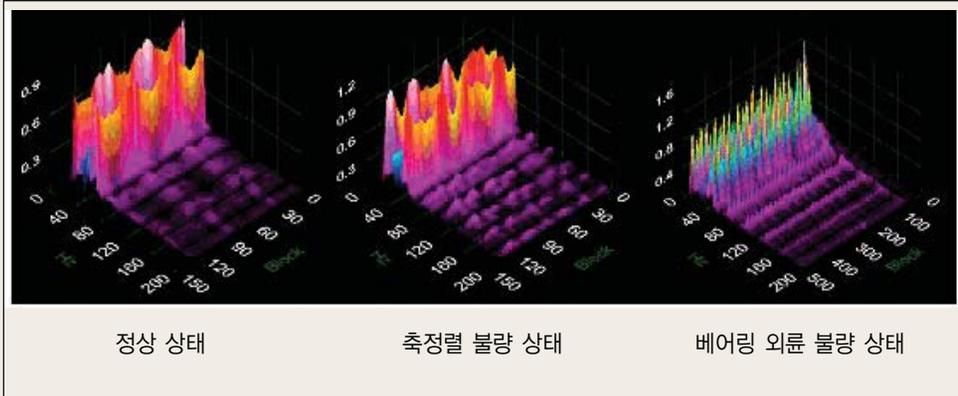
단시간 FT (STFT, Short-time Fourier Transform)은 음성, 음악 및 시변(Non-stationary) 신호해석의 시간-주파수 변환에 많이 사용되지만, 신호를 한번에 취득하여 주파수 축으로 변환하는 윈도우크기에 관한 정확한 예측이 어렵기 때문에 작은 크기의 윈도우로부터 점차 윈도우의 크기를 증대 시키면서 주파수의 특성을 보아야 하므로 계산의 양이 증대되며 주파수 특성의 분해능이 윈도우의 크기에 따라 매우 민감하다.

웨이블릿 변환(Wavelet Transform)은 Short-time Fourier transform과 비슷한 해석 방법이며 윈도우 크기를 최적화 하는데 중점을 둔 분석 방법이다.

위그너 분포(WD, Wigner distribution) 은 주파수와 시간의 분해능을 선택하는 것이 가능하기 때문에 위에서 설명한 다른 해석방법의 단점을 보완하면서 시간-주파수 표현이 가능하고, 많은 수학적 특성을 만족한다. 특히, 위그너-빌 분포(WVD) 기법에서 주파수의 적분은 순간 power 이고 시간 적분은 스펙트럴 에너지분포가 되므로 시간-주파수 및 크기의 추이를 표현할 수 있기 때문에 신호의 특성을 분석하는 좋은 도구가 된다.

기존의 신호해석은 시간 및 주파수 각각에 대한 신호의 크기를 2차원으로 표시하므로 시간 또는 주파수 변화에 따른 신호분석이 불가능하였으나, 시간-주파수 분석기법은 입력신호를 특정 시간 및 주파수에서 신호의 에너지 밀도를 3차원으로 표시하는 것이 가능하다.

따라서 시간에 따라 변화하는 주파수 성분이나 통계학적인 성질을 갖는 신호분석에 적용 가능한 시간-주파수축 분석기법을 회전기기 진단에 사용하여 각각의 고장 원인들이 에너지 분포에 기여하는 정도를 측정 함으로써 고장을 식별하기가 용이해 진다.



[그림 5] 회전기기의 각 상태별 시간-주파수축 분석 결과
(위그너-빌 분포기법 사용)

[그림 5]는 위그너빌-분포기법을 사용하여 축정렬 불량상태와 베어링 외륜 불량 상태를 분석한 결과를 3차원으로 표시한다. 그림에 나타난 바와 같이 정상 상태와 축정렬 불량 상태의 에너지 밀도가 크게 차이가 발생하고 베어링 외륜은 볼이 외륜 손상부를 지날 때 마찰에 의해 발생하는 임팩트 에너지가 잘 관찰되고 있다.

이와 같이 시간-주파수축 분석기법은 주파수축 분석 기법보다 시간에 따라 변화하는 신호를 잘 관찰할 수 있도록 해 주므로 고장을 자동 진단하는 각종 알고리즘을 도입할 때에도 유용하다.

<다음호에 계속>