

이제는 전력선 기술이다(2)

“안전을 위한 기술 개발”



정재천 공학박사
한국전력기술(주)
원자로설계개발단

본 원고를 준비하면서 전력선 신호분석 기술의 개발 방향과 지향하는 궁극적인 목표가 무엇인가에 대해 깊이 생각하게 되었다.

필자는 본 기술의 목표를 “우리의 안전”에 두었다. 천만금보다 소중한 우리의 생명을 지키는 일, 바로 전력선 기술이 이루어 낼 것이다.

자, 그럼 이번 글의 작은 제목을 “안전을 위한 기술 개발”로 하고 오늘의 이야기를 시작하자.

본 기술을 연구하게 된 가장 큰 요인은 지인으로부터 “탄광촌의 생활”에 대해 듣게 되면서 부터였다. 우리나라 무연탄 채집 광산 중 가장 깊은 곳은 지하 2km 깊이의 작업장을 가진 곳이라고 한다. 아파트 층수로 대략 지하 700층에서 작업해야 하는 광부들을 지탱해 주는 것은 바로 두대의 대형 “송풍 팬”.

이 송풍 팬은 광부들의 호흡을 가능케 하는 산소 마스크와 같다. 이와 같이 중요한 기기가 산 정상에 설치되어 관리가 쉽지 않다는 지인의 얘기를 듣는 순간, 미국 오콜릿지 국립연구소에서 발표하기 시작한 MCSA(Motor Current Signature Analysis) 연구논문 내용이 떠올랐고 몇 차례의 검토와 보안을 거친 후 MCSA 기술을 대폭 개선한 “전력선 신호분석 기법 분야” 연구를 시작하게 되었다. 그러므로, 전력선 기술이 “안전”을 최종 목표로 삼는 것은 당연한 것이리라.

자 그럼 “안전”을 지양하는 전력선 기술의 내부를 좀 더 자세히 들여다 보자.

1. 자체 평가표의 작성

전력선 기술에 대해 본격적으로 설명을 하기 전에 여러분께 다음과 같은 자체 평가표를 작성하실 것을 추천한다. 내가 과연 앞으로 접하게 될 내용에 대한 기본적인 지식을 갖고 있는가, 내용이 익숙치 않다면 어느 부분의 지식을 좀 더 갖추어야 할 것인가를 생각해 보는 좋은 기회를 제공할 것이다.

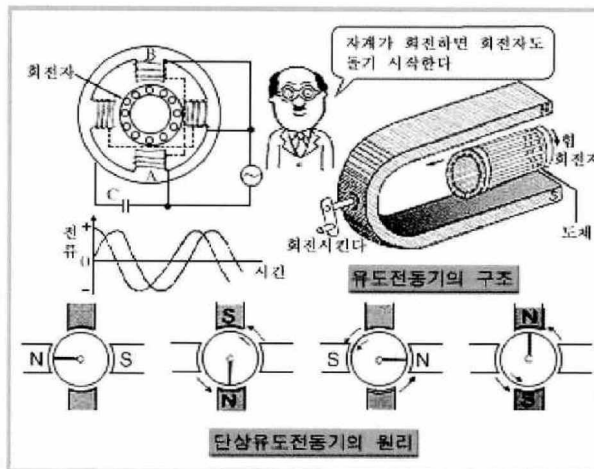
만일 다섯 항목 이상에 (예)를 표시하셨다면 여러분은 본 기술을 100% 활용하실 수 있을 것이다. 그만큼 본 기술은 복잡하지 않고 비교적 이해가 쉽다.

이번 호에는 전력선 신호분석 기술의 개념적 이해를 돕기 위해, 전동기의 구조와 신호처리 개요에 대해 중점적으로 설명하고자 한다.

평가 항목	자체 평가		참조 부분	수목 순서
	예	아니오		
분해된 전동기를 구경한 적이 있다.			전동기의 구조	
전동기의 작동 원리에 대해 알고 있다.				
푸리에 변환과 FFT 알고리즘의 개념에 대해 알고 있다.				
디지털 신호처리에 대한 개념을 이해하고 있다.			디지털 신호처리 기초	
전동기 및 구동기의 고장 요소를 알고 있다.			전동기 및 구동기 고장 요소	
진동 감시 기법을 이해하고 있다.			진동 감시 기법	
전동기 및 구동기 고장시 확인하는 방법에 대해 알고 있다.			전동기 및 구동기 고장 유형 및 확인방법	

2. 전동기의 구조

유도전동기는 교류전동기 중 가장 널리 쓰이고 있다. 가정에 있는 선풍기, 에어컨, 냉장고로부터 발전소 냉각재 펌프 (RCP)에 이르기 까지 유도 전동기는 우리의 생활을 편리하게 하는 좋은 벗이다. 유도전동기는 회전자 설계가 매우 간단하고 비교적 큰 힘을 낼 수 있기 때문에 널리 사용된다. 물론 구조가 간단하므로 다른 방식의 전동기에 비해 고장 발생도 적다. 원자력발전소에 설치된 전동기의 90% 이상이 유도 전동기이니 인간이 만든 전기기기 중 이처럼 유용하게 쓰이는 기기가 또 있을까?

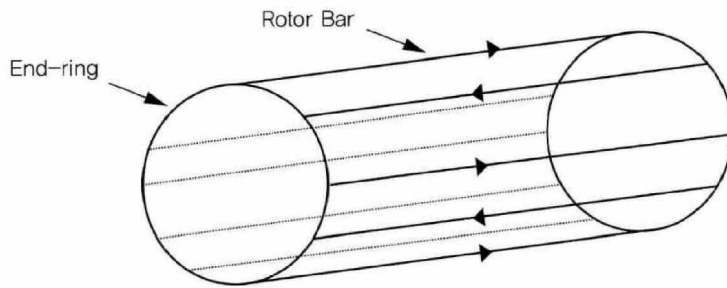


[그림 1] 유도 전동기의 구조와 원리

[그림 1]을 이용하여 유도 전동기의 구조와 원리에 대해 설명하고자 한다. 말굽 자석 안쪽에 다람쥐 쳇바퀴(Squirrel Cage) 처럼 생긴 회전자를 넣고 자석을 돌리면 원통 회전자는 자석의 회전수 보다 약간 늦은 속도로 따라 돌게 된다. 이것은 자석이 돌면서 회전하는 자계를 만들고 회전자의 각 도체에 유도 전류가 흘러 자계의 방향과 같은 방향으로 회전하는 힘이 생기기 때문이다.

말굽 자석 대신 교류를 사용하는 경우에도 같은 결과를 얻게 된다. 영구자석 대신 전자석을 사용하면 교류의 특성 때문에 자석을 돌리지 않고도 회전 자계를 발생시키므로 회전자가 따라 돌게 된다.

[그림1]의 왼쪽 맨 위에는 원통 내부에 돌기가 4개 마련되어 있고 코일이 감긴 부분이 보인다. 이 코일이 감긴 부분을 고정자라고 하고 전기는 이 코일을 통해 공급된다. 즉, 전자석이 설치되어 있는 것이다. 가운데 원통은 회전자로서 회전자 내부에는 많은 수의 막대기 (Rotor Bar)가 있어 유도된 전류를 흐르게 한다. 유도 전류는 [그림 2]와 같이 엔드링(End-ring)을 통해 폐 회로를 순환한다.



[그림 2] 회전자의 구조

회전자의 운동을 정의하기 위해 슬립(Slip)이라는 용어를 사용한다. 동기 속도와 회전자 속도를 표현하는 슬립은 상대 속도로 정의되며 식(1)과 같이 표현한다.

$$n_{slip} = n_{sync} - n_m \quad (1)$$

식 (1)에서 n_{slip} 은 동기 속도이다. 자극(Magnetic Pole)이 4개인 전동기에 60Hz의 전기를 공급하면 1800rpm의 속도로 회전하는 것을 동기 속도라 한다. n_m 은 회전자의 속도이다. 회전자의 속도는 부하가 결정한다. 즉, 많은 토크가 전동기에 걸리면 속도는 줄어들고 슬립은 커지게 된다.

백분율로 표현한 상대 속도가 슬립을 정의하는데 많이 쓰이며 식 (2)와 같이 표현된다.

$$s = \frac{n_{slip}}{n_{sync}} = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} \times 100 \quad (2)$$

만일 회전자가 동기속도로 회전한다면, 다시 말해 부하가 걸리지 않고 회전자 베어링의 마찰도 무시할 수 있다면 $s=0$ 이 된다. 회전자가 정지해 있으면, 즉 부하가 너무 커서 전동기를 정지 시키는 순간 $s=1$ 이 된다.

전력선 신호분석을 이용하여 전동기나 회전기기를 진단하는 기술에 있어 전동기의 회전수를 정확히 측정하는 기술은 무엇보다 중요하므로 이 개념을 꼭 이해하시기 바란다.

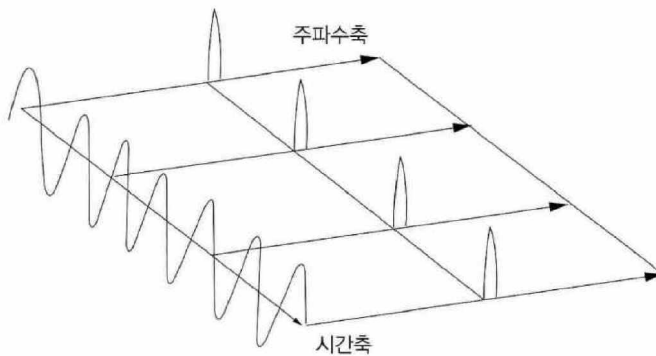
3. 디지털 신호처리

우리는 디지털 시대에 살고 있다. 팔뚝에 MP3를 차고 귀에는 이어폰을 꽂고 설새 없이 휴대폰이나 PDA를 조작하는 젊은이들을 우리 주위에서 얼마든지 볼 수 있다. 우리는 그들을 디지털 노매드라 부른다. 그들의 배낭에는 노트북과 몇 개국 언어를 번역하는 전자사전도 들어있다.

그렇지만 디지털로 운영되는 기기도 인간의 오감과 연결되기 위해서는 결국 아날로그로 최종 변환되어 정보를 제공해야 한다. “0”과 “1”로 이루어진 암호 같은 코드를 정보로 직접 인식할 수 있는 인간은 아직 나타나지 않았으니까.

디지털은 우리 생활의 일부가 되었지만 우리의 눈, 귀, 입, 심지어 육체 조작도 철저히 아날로그적이다. 따라서 디지털 신호처리의 개념에 대한 깊은 지식이 없어도 “전력선 신호분석 기술”을 이용하는 것에는 아무런 문제가 없다. 다만 응용의 차원에서만 문제가 될 뿐.

[그림 3]을 보라. 시간에 따라 변화하는 신호가 주파수축에는 어떠한 고정값을 가진다는 것을 알 수 있을 것이다. 바로 이것이 시간축의 주파수축 변환의 개념이다.



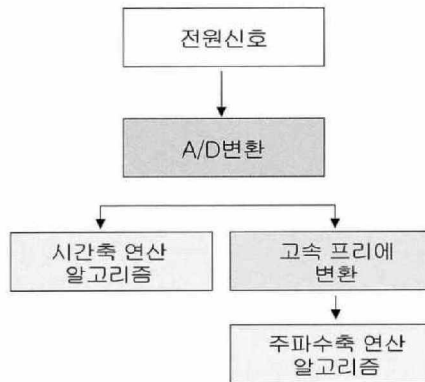
[그림 3] 시간축 신호의 주파수축 변환 개념

전력선 신호분석 기술은 회전기기에 공급되는 전압과 전류 신호를 취득하는 것으로부터 시작한다. 즉, 전동기가 센서로 작용되어 회전기 감시 시스템에 기기 정보를 제공하는 것이다.

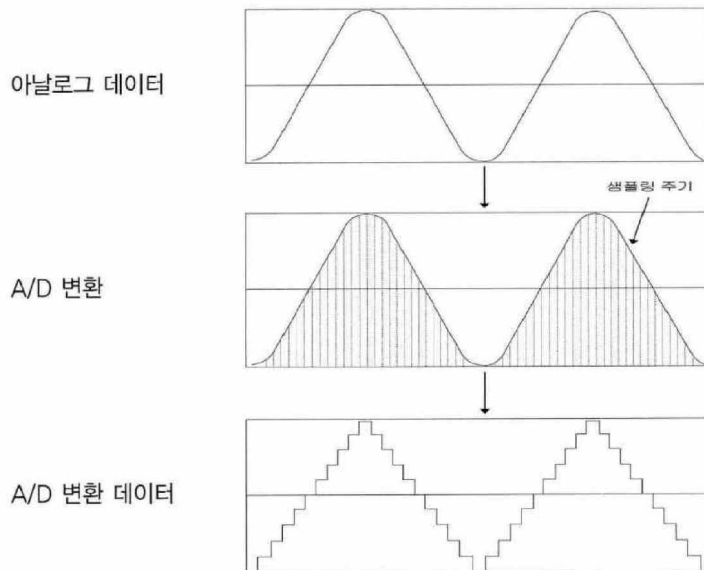
전원에서 수집된 신호는 시간에 따라 변화하는 아날로그 신호이므로 컴퓨터가 바로 처리할 수 없다. 따라서 [그림 4]와 같이 디지털 신호로 변환하는 과정이 필요하다. A/D변환기는 바로 연속적인 아날로그 신호를 이산적인 “0”, “1”로 구성된 신호로 변환하는 역할을 한다.

A/D 변환기의 샘플링 주파수는 (Sampling Frequency)는 측정하고자 하는 신호의 최대 입력 주파수

보다 최소한 두 배 이상이어야 한다. 샘플링 주파수가 느린 경우, 원래의 신호 주파수 성분에 마치 주파수가 겹쳐 있는 것 같은 A/D 변환 결과가 발생하는데 이것을 에일리어싱(Aliasing) 효과라고 부른다. 변환된 데이터는 [그림 5]와 같이 불연속적으로 표현된다.



[그림 4] 디지털 신호 변환 과정



[그림 5] A/D 변환된 데이터의 모습

변환된 디지털 신호는 시간축에서 토크나 임피던스 시킨스를 계산하기 위해 사용되기도 하지만, 주파수축 분석을 위해 추가적인 신호처리 단계를 거치기도 한다.

그러면, 주파수축 분석을 위한 신호 변환에 대해 알아보자.

국내 발전소에서 공급하는 전원은 1초에 60번 변화하는 정현파이다. 즉 주파수축에서 분석해 보면 60Hz 에서 그림3과 같은 피크가 생김을 알 수 있다. 만일 전원에 어떠한 잡음도 유입되지 않을 경우, 주파수축으로 변환된 신호는 [그림3]과 같이 시간이 변화해도 60Hz 위치에서 지속적인 피크를 나타낼 것이다. 이것을 아주 간단한 수식 (3)으로 표현해 보자

$$f = \frac{1}{T} \quad (3)$$

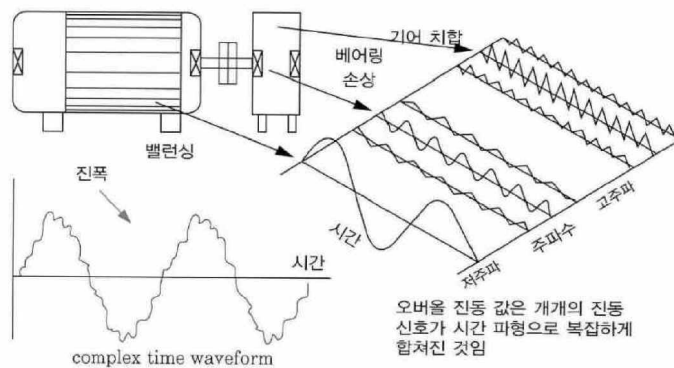
여기서 f 는 주파수이고 T 는 진동이 1회 발생하는 시간이다. 즉 1초에 60번 진동하는 전원 주파수는 60Hz가 된다. 그러면 주파수 측정시 해상도는 어떻게 결정되는가. 식 (4)를 살펴보자

$$\Delta f = \frac{f_{max}}{N} \quad (4)$$

식(4)와 같이, 주파수 해상도는 측정하고자 하는 최대 입력 주파수 범위 (f_{max})를 데이터를 샘플링한 숫자로 나눈 것이다. 시간축에서 얻은 신호를 주파수축 신호로 변환하는 기법으로는 고속 푸리에 변환 (Fast Fourier Transform, FFT)이 대표적으로 사용된다.

$$X(\omega) = \text{FT}\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (5)$$

식 (5)의 푸리에 급수에서 알 수 있듯이, 연속적인 신호 $x(t)$ 가 주파수 ω 를 갖는 이산적 데이터인 $X(\omega)$ 로 바뀌는 것을 주파수축 변환이라 정의한다.



[그림 6] 회전기기가 연결된 전동기의 전류 신호 및 주파수축 변환 신호

FFT는 이산 푸리에 변환(Discrete Fourier Transform, DFT)을 고속으로 산출하기 위한 알고리즘으로서 512×512 배열을 갖는 시간축 데이터를 DFT보다 약 10,000배 빠르게 변환할 수 있다.

[그림 6]의 전동기에 연결된 회전기기가 기어 치합(Gear-mesh) 불량 혹은 베어링 손상을 나타낼 때, 연속적인 진류 신호와 주파수축 신호가 어떻게 변화되는지 분석하여 보자. 먼저 시간 축에서의 신호는 전원 신호인 정현파와는 다르게 잡음 성분이 많이 유입되어 측정됨을 볼 수 있다. 이를 주파수축으로 변환(FFT)하여 보면 원래의 정현파 위에 차수가 낮은 고조파부터 차수가 높은 고조파 까지 혼합되어 있음을 알 수 있다. 각각의 고조파는 베어링 손상에 의한 비교적 낮은 고조파부터 기어의 치합 불량으로 인한 높은 차수의 고조파로 분해될 수 있다.

전력선 신호분석 기법 중 주파수축 분석에 의한 기기 상태 감시는 바로 이러한 원리를 이용하여 미리 정해진 이론적 관측값과 실제 측정된 측정값과의 비교를 통해 기기의 상태를 진단한다.

이로써 약간은 골치 아픈 2단계 강의가 끝났다. 이제 다음 호에 게재될 3단계 강의에서는 전동기 및 구동기 고장 요소, 진동 감시 기법, 그리고 전동기 및 구동기 고장 유형 및 확인 방법에 대해 상세히 다루고자 한다.

<다음호에 계속>