

전류신호의 유사도 평가와 통계적 상관관계를 이용한 유도전동기의 온라인 고장진단

On-line faults diagnosis of induction motor using
similarity measure and statistical correlation

김영인, 김연태, 김성신
부산대학교 전기공학과

Young-In Kim, Yeontae Kim, Sungshin Kim

School of Electrical and Electronic engineering, Pusan National University

E-mail : kyi97@pusan.ac.kr

요약

산업화와 더불어 자동화의 요구에 따라 여러 분야에서 유도전동기의 응용 사례가 늘어나고 있다. 본 연구는 인버터단의 전류센서에서 실시간 얻어진 전류신호로부터 대표적인 전기, 기계적인 4가지 고장(Bearing Fault, Broken Rotor bar, Misalignment, Unbalance)을 검출하여 예기치 못한 고장에 대비할 수 있는 실시간 진단 알고리즘을 제시한다. 실시간 진단의 핵심요소인 동기화 방법으로서 Hilbert Transform을 응용하였다. 총 40세트의 정상 모터 데이터를 임의로 선택하여 두 데이터의 차를 이용하여 0에 근사한 정상 모터 템플릿 값을 설정하였다. 이를 이용하여 진단 대상 전동기의 고장 유무를 미리 판단하게 된다. 만약 기준치 이상의 오차가 나타나게 되면, 이와 비교하기 위한 미리 수집된 각4가지 고장 전동기의 미소신호 템플릿 데이터와의 유사성을 비교하여 고장의 종류를 표시하며, 고장의 종류가 진단되지 않은 대상은 고장 유무만 표시된다.

Key words: 유사도 평가, 상관관계, 유도전동기, Hilbert transform, 고장진단

I. 서론

산업화의 발전과 더불어 구조적인 변화와 자동화 형태가 모듈화 되므로 산업용 로봇, 공작용 기계 등의 소규모와 제철, 제지, 섬유 등의 대규모 구동 시스템 및 엘리베이터, 전기 철도 등의 수송 시스템의 동력원으로 광범위하게 이용되고 있는 전동기는 생산성과 품질 향상을 이루고 에너지 효율을 증대 시키는 핵심 요소로 증대되고 있으며, 산업 공장마다 전동기의 사용 빈도가 갈수록 커지고 있는 실정이다[1]. 그 중에서도 유도전동기는 브러쉬나 정류자가 없어 기계적인 마모에 의한 유지비용이 적고 견고하여 대용량화 및

대규모화 시킬 수 있어 산업용으로 신뢰성을 보여 비용 절감에 효과적으로 나타나고 있다. 이에 반해 유도전동기의 기계적 및 전기적인 원인에 의해 발생하는 고장현상을 이 나타나고 있는데 그 중에서도 베어링 고장, 회전축자 바 손상, 커플링 정렬 불량, 회전축 불평형 등의 유도전동기 고장이 90%이상을 차지하고 있다고 조사되었다. 대부분 산업현장에서 유도전동기 고장이 발생하였을 경우나 혹은 주기적인 점검을 통해서 고장을 판단하는 경우가 대부분 이었다[2, 3].

본 연구에서는 유도전동기 전류센서를 이용하여 주기적으로 취득한 전류신호를 이용하여 실시간으로 정상전류신호와 비교하여 유사도 평가와 통계적 상관관계를 통해서 비교하여 고장전류신호

유무를 판단하여 Bearing fault, Broken rotor bar, Misalignment, Unbalance 4가지 고장에 대해서 유도 전동기의 온라인 고장진단 시스템을 구축 본 논문에서 제시한 고장진단 알고리즘을 통해 고장 유무를 판단할 수 있는지를 보여주고 있다[4, 5].

II. 본론

2.1 유도전동기 전류 계측시스템

본 연구에서는 표 1에서 볼수 있듯이 유도전동기 전체 고장 중에서 80~90%를 차지하는 베어링, 고장 고정자/회전자 고장, 회전자바 손상, End ring 고장에 대해서 연구하고자 하였다.

표 1 유도전동기의 고장 비율과 원인

고장 종류	고장 비율	비고
베어링 고장	고장의 40~50%	베어링 고장에 의한 결과를 해석하고 연구한 결과 미흡
고정자/회전자 고장	고장의 30~40%	불평형 상전류로 인한 전동기 임피던스의 비대칭이 원인
회전자바 손상/ End ring 고장	고장의 5~10%	주파수 영역개석 계수식별 방법을 통하여 진단 방법이 제공
Air-gap 편심	고장의 10%이상	Air-gap과 고정자, 회전자와의 불평등에 기인(정적 편심과 동적 편심으로 나뉨)

3상 유도전동기의 전류 신호 데이터를 측정하기 위해서는 AC 서보 드라이버 시스템에 인버터 단을 연결하여 Normal(정상), bearing fault(베어링 고장), Broken rotor bar(회전자바 손상), Misalignment(커플링 정렬 불량), Unbalance(회전축 불평형) 등 대표적인 5가지 전류신호에 대해서 측정하는 시스템으로 그림 1과 같은 AC 서보 드라이브 시스템으로 구성되어 있다.

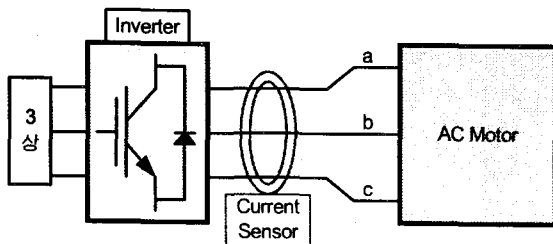


그림 1 AC 서보 드라이브 시스템

그림 1에서 측정한 5가지 전류 신호는 3상중에

서 첫 번째인 a상에서 2.32초 간격으로 16384 point로 이루어진 신호가 측정되며 총 40번이 측정된다.

2.2 유도전동기 고장 진단

유도전동기에서 추출한 전류 신호 5가지를 취득한 후 신호를 정량화와 동기화를 시키기 위해서 Normalize, Synchronize, Hilbert Transform 방법을 이용하였고 실제 고장 신호와 실시간으로 들어오는 신호의 고장 유무를 판단하기 위해서 상관관계와 유사도 평가 기법의 비교를 통해 각 고장별로 인식이 우수한 기법을 선택하고자 한다.

2.3 고장진단을 위한 전처리기법

2.3.1 White Noise와 대책

본 연구에서 적용된 전류 신호는 각종 고장에 따른 특정 주파수를 가지는 성분(고주파)이 나타나는데 정상적인 상태의 정보에서 특정 고장에 대한 노이즈 향이 추가된 정보를 얻을 수 있다. 다음 수식에서 초기 측정된 전류 정보를 보여주고 있다.

$$\tilde{f}(t) = f_H(t) + DN(t) + MN(t)$$

여기서, f_H 는 정상 상태 신호(healthy signal), $DN(t)$ 는 고장 신호, $MN(t)$ 은 측정 잡음(noise)을 나타낸다.

$$\tilde{f}_{\text{avg}}(t) = \frac{\int_0^N f_H(t\%l) + DN(t\%l) + MN(t\%l) dt}{n}$$

위 식에서 $MN(t\%l)$ 성분의 전체 적분 항은 앞에서 언급하였듯이 랜덤 노이즈의 성질을 가지고 있으므로 데이터의 개수 N 이 충분히 많다고 하면 전체 적분 구간에서 0으로 될 것이다.

$$\tilde{f}_{\text{avg}}(t) = \frac{\int_0^N f_H(t\%l) + DN(t\%l) dt}{n}$$

2.3.2 Normalize

필터링 과정을 거친 후 전체 16384 point를 128×128주기의 데이터로 다시 샘플링 하였다. 데이터의 모양에서 각 최대치에서 조금씩의 차이가 보이지만 그 크기가 미미하여 각 고장을 분류하는 것이 어려운데 이 신호를 정량화하기 위하여 아래의 식을 적용하였다.

$$SN_k^j = \frac{\sum_{i=1}^{128} SN_i^j(t_k)}{128} \quad i=1, 2, \dots, 128,$$

$$t=1, 2, \dots, 128 \quad j=1, 2, 3, 4, 5 \quad 0 < k < 2.13$$

2.3.2 Hilbert Transform

Hilbert Transform은 입력신호에 대해 일정한 진폭 응답과 모든 주파수 성분에 대해 90°의 위상천이를 발생시키는 특징을 가지고 있다.

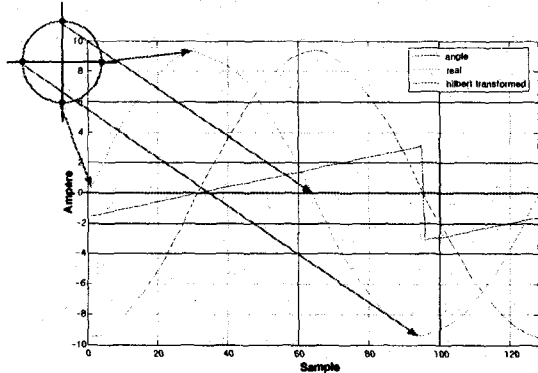


그림 2 Hilbert Transform

2.3.3 템플릿 구성

5가지 템플릿을 구성하기 위해서는 normal, bearing fault, broken rotor bar, misalignment, unbalance를 정상인 normal 신호에서 각 고장 신호를 빼낸 값을 템플릿으로 구성하였다. 그림 4에서 템플릿을 보여주고 있다.

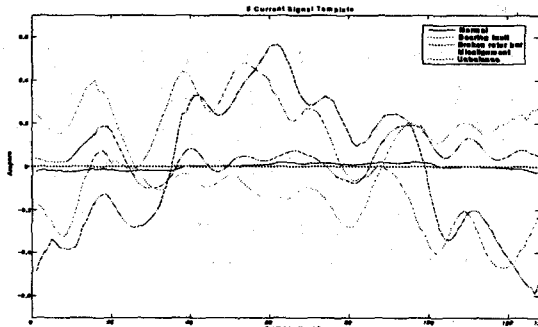


그림 3 Current Signal Template

2.4 유사도 평가

분류하는데 있어서 입력 변수들 간에 연관성을 찾는 방법으로 유사도 평가(Similarity Measure)는 임의의 두 신호의 유사도를 계산하여 어느 정도 일치하는지를 판단하는 방법이다.

여기서 a, b는 각각의 신호를 나타낸다. 만약 $Sim(M_1, M_2)$ 의 값이 1에 가까운 값이며 이와 반

대로 -1에 가까운 값이면, 두 신호의 상관관계는 없음을 나타낸다.

$$Sim(M_1, M_2) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |a(i) - b(i)|}{L_{\infty} |a - b| \times n}$$

2.5 통계적 상관관계

두 개의 연속변인 (continuous variable)들 사이의 공변성을 나타내는 지수로써 변량분석에서는 독립변인이 언제나 범주변인 (categorical variable)으로 간주되고, 종속변인은 언제나 연속변인으로 간주되므로 r^2 가 나타내는 공변성은 범주변인과 연속변인 사이의 공변성이다. 따라서 r^2 의 제곱근 (r)을 구한 것을 범주변인과 연속변인 사이의 상관관계를 나타내는 지수로 사용한다. 범주변인의 경우에는 그 값의 방향이 무의미하므로 r 은 언제나 0보다 큰 값만을 가지는 상관계수이다.

$$\sqrt{R^2} = \sqrt{\frac{\sum (\hat{Y} - \bar{Y})^2}{\sum (\hat{Y} - \bar{Y})^2 + \sum (Y - \hat{Y})^2}} = \sqrt{\frac{\sum (b_0 + b_1 X - (b_0 + b_1 \bar{X}))^2}{\sum (Y - \bar{Y})^2}}$$

$$= \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X - \bar{X})^2 \sum (Y - \bar{Y})^2}} = r$$

두 변수 X와 Y 사이의 선형적 상관관계를 파악할 수 있다. 상관계수(Correlation coefficient)는 -1에서 +1 사이의 실수값을 취하며, 0을 취할 때에는 두 변수는 선형적으로 아무런 관계가 없음(독립)을 의미한다.

III. 결과

그림 4는 고장진단의 전체적인 구성도이다.

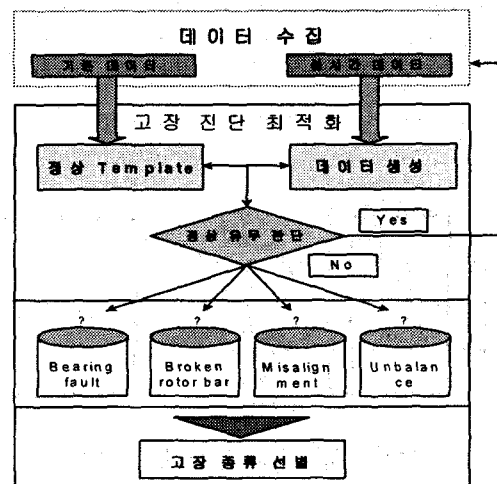


그림 4 고장진단 전체 구성도

템플릿 신호와 실시간으로 측정된 신호의 비교를 통해서 고장 신호를 파악하기 위해서 먼저 유사도 평가를 통해서 표 2와 같이 베어링 고장에 대해 좋은 성능을 얻었으며 통계적 상관관계를 이용하여서는 표 3에서 보여주듯이 회전축바 손상, 커플링 정렬 불량, 회전축 불평형에 대해서 좋은 결과를 얻었다.

표 2와 표 3을 통해서 얻은 데이터를 바탕으로 유사도 평가와 통계적 상관관계를 비교해 봤을 때 표 4와 같은 결과를 얻었다.

표 2 유사도 평가 수치

표 3 통계적 상관관계 수치

표 4에서 대부분의 고장에 있어서 통계적 상관관계의 방법이 우수한 결과를 얻었으며, 베어링 고장의 경우 유사도 평가의 방법이 더욱 우수함을 알 수 있었다. 이러한 결과를 바탕으로 두 가지 기법 중에서 최고값을 선택하여 유무 판별률로 86%라는 수치를 얻을 수 있었다. 회전축 불평형에 관한 유무 판별력을 향상 시키는 게 향후 과제로 나타나고 있다.

표 4 고장진단 최적화 도표

IV. 결론

유도전동기의 고장진단 알고리즘을 개발하기 위해서 많은 플랜트에서 취득한 전류 및 진동 신호를 이용하여 비용 절감 및 생산성 향상을 위해 최적화하기 위해서 많은 연구를 해오고 있다.

본 논문에서는 기존에서 사용하였던 FFT와 Park's vector를 이용한 유도전동기 고장진단을 활용하지 않고 베어링 고장, 회전자바 손상, 커플링 정렬 불량, 회전축 불평형 등의 4가지의 고장난 유도전동기로부터 취득한 템플릿을 형성 하였고, 여러 가지 전처리 기법을 적용하여 4가지 고장과 비슷한 알고리즘을 정상과 고장 신호의 시간에 따른 상관관계와 유사도 평가를 비교하여 고장 유무가 비슷한 템플릿이 측정하여 비교적 신뢰할 만한 결과를 취득 할 수 있었다.

실험을 통해 제안한 알고리즘을 이용하여 실시간으로 고장진단이 가능한 결과를 얻게 되어 보다 신뢰할 수 있는 유도전동기 실시간 고장진단 시스템을 구성할 수 있을 것이다.

감사의 글 : 본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 (R-2004-B-129) 주관으로 수행된 과제임

V. 참고문헌

- [1] G. B. Kliman and J. Stein, "Induction motor fault detection via passive current monitoring," International Conference in Electrical Machines, Cambridge, MA, pp. 13-17, August 1990.
- [2] 김호원, 유도 전동기 구동 시스템의 고장 진단, 서울대학교 전기공학과 석사 학위 논문, 1994
- [3] Masoud Haji, Hamid A. Toliyat, IEEE, "Pattern Recognition/A Technique for Induction Machines Rotor Broken Bar Detection", IEEE Transactions on VOL. 16, Issue. 4 pp(s):312 - 317 , DECEMBER 2001
- [4] D. Dyer and R. M. Stewart, "Detection of rolling element bearing damage by statistical vibration analysis", Asme Jurnal of Mechanical design. vol. 100, pp. 229-235, April 1978.
- [5] R. R. Schoen, T. G. Habetler, F. Kamran and R. G. Bartheld, "Motor Bearing Damage Detection Using Stator Current Monitoring", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 31, No. 6, November/December, 1995.