

주파수 해석을 이용한 유도전동기의 고장 검출 및 분류

Frequency Analysis based Fault Detection and Isolation of Induction Motors

°신필재, 이인수, 전기준

경북대학교 전자·전기공학부, 제어계측신기술연구소
(Tel: (053)950-5524; Fax: (053)950-5505; E-mail: gjjeon@ee.kyungpook.ac.kr)

Abstracts Recently, induction motors are used more widely because of their low cost and simple structure. Therefore, the importance of fault detection and isolation of induction motors significantly increases. In most case the line current is used for fault detection and isolation. But in case that an induction motor has an inverter for control, it distorts the information of faulty state included in the line current. This paper proposes a new method for fault detection and isolation of induction motors that is speed controlled by the inverter using frequency analysis of the reference current instead of the line current for fault detection and isolation.

Keywords Induction motor, Inverter, Fault detection, Fault isolation, Frequency Analysis

1. 서 론

시스템이 점점 복잡해지고 또 정교해짐에 따라 시스템의 고장 가능성은 점차 커지고 있고, 생산공정에서의 고장은 생산성의 저하를 초래할 뿐 아니라 고장이 발생한 기기의 조작자의 안전을 심각하게 위협할 수도 있으므로, 고장의 조기 검출(fault detection)과 분류(isolation)는 매우 중요한 문제라 할 수 있다. 이에 따라 공정의 생산성 및 안정성의 향상을 위해 시스템 고장의 검출 및 분류에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔다[2,6].

유도전동기는 직류전동기와 달리 정류기(rectifier)와 브러쉬(blush)가 없어 정기적인 보수가 필요 없기 때문에 최근 들어 생산 현장에서 주된 동력원으로 자리잡아 가고 있고, 그에 따라 유도전동기의 고장 검출 및 분류 알고리즘에 대한 연구가 필요하다[6]. 유도전동기의 고장 검출 및 분류를 위한 방법으로는 전동기의 진동 신호(vibration signal), 자장(magnetic flux) 그리고 고정자 전류(line current)를 주파수 해석하는 방법 등이 있다[6]. 먼저, 진동을 이용한 방법에서는 전동기에 진동 신호를 측정하기 위한 변위 센서를 부착하여 진동 신호의 주파수 해석을 통하여 고장 검출 및 분류를 수행한다. 그러나, 이 방법은 시스템의 진동을 정확히 측정하기 위한 센서와 이를 고정시키기 위한 지지대를 필요로 하는 문제점이 있다. 반면, 자장을 이용하는 방법에서는 전동기 내부 또는 외부에 자장을 측정하기 위한 코일을 감아서 자장에 의해 코일에 유도되는 전압의 주파수 해석에 의하여 전동기 상태를 알아낼 수 있으나[3], 이 방법 역시 전동기의 자장을 측정하기 위한 별도의 장치가 필요하고 회전자 고장에 대한 고장 분류가 어렵다[1,4]. 마지막으로 고정자 전류의 주파수 해석을 통하여 고장의 검출 및 분류를 하는 방법은 데이터의 획득이 쉽고 고장 분류에 가장 유리하여 가장 많이 사용되고 있는 방법이다[2,5,6].

기존의 고장 검출 및 분류 알고리즘들은 위에서 열거한 방법들을 사용하여 시스템의 고장이 생산성과 안전성에 직접적이고 치명적인 영향을 미치는 발전소, 제철소 등의 열악한 환경 하에서 운전되는 대용량의 전동기를 대상으로 한 것으로 일반적인 3상 전압을 인가하여 정속도로 운행되는 전동기만을 다루었다. 그러나 최근 들어 벡터 제어(vector control) 등과 같은 제어 기법의 발전에 따라 유도전동기의 제어 성능이 향상됨에 따라 기존에 직류전동기가 사용되던 고정밀, 고성능 산업용 기

기 등 보다 정밀한 동작을 요구하는 곳이나 소형의 직류전동기가 사용되던 시스템 등으로 점차 그 활용 범위가 넓어지고 있다. 그러나 제어가 포함된 유도전동기는 고정자 전류가 제어기와 인버터(inverter)의 영향을 받아 가지고 있던 시스템 상태에 관한 정보를 잃어버리게 되므로, 고정자 전류로는 고장 검출 및 분류가 어렵다. 그러므로, 인버터까지 포함한 유도전동기의 고장 검출 및 분류를 위한 새로운 알고리즘이 필요하다.

본 논문의 구성은 먼저 2장에서 기존의 유도전동기 고장 검출 및 분류에 사용된 알고리즘을 살펴보고, 3장에서는 속도 제어 루프가 포함된 유도전동기의 구조와 고장 검출 및 분류에 있어서의 특징에 대하여 알아보고 인버터에 영향을 받지 않는 새로운 검출 및 분류 알고리즘을 제안한다. 마지막으로 제안한 방법을 모의 실험을 통하여 그 성능을 확인하였다.

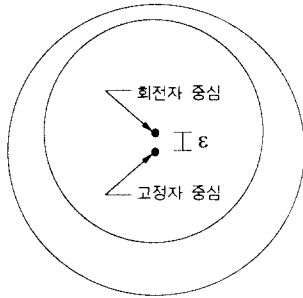
2. 유도전동기의 고장 검출 및 분류

유도전동기는 고정자(stator)와 회전자(rotor)사이의 공극 자장(air-gap flux)에 의해 발생된 전자기력(electromagnetic force)에 의해 회전자가 힘을 받아 회전하는 원리로 동작을 하게 되고, 회전자가 받는 힘은 공극 자장 밀도의 제곱에 비례한다[1]. 그러므로, 회전자나 고정자에서 발생한 고장은 회전자의 회전에 따라 회전자에 가해지는 전자기력의 변화를 일으키며, 이로 인해 각 고장에 따라 고유 주파수(characteristic frequency)를 가진 편심(eccentricity)이 발생하게 된다[6]. 이러한 편심은 공극(air-gap)의 길이에 변화를 주게 되고, 편심에 의해 나타나는 공극 길이의 변화는 유도전동기의 인덕턴스에 직접적인 영향을 미치게 되어 결국 고정자 전류에 편심의 영향이 나타나게 되므로, 고정자 전류를 관찰함으로써 고장 검출 및 분류가 가능하다[1,4,5].

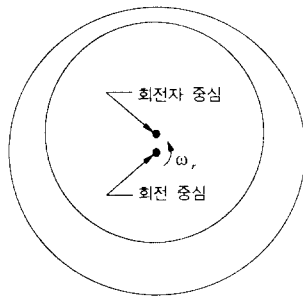
2.1 편심

전동기에서의 편심에는 정적편심(static eccentricity)과 동적편심(dynamic eccentricity) 두 가지가 있다[6]. 정적편심은 그림 1 a)와 같이 회전자의 중심과 고정자의 중심이 일치하지 않는 경우로 공극의 길이가 최단거리가 되는 점이 일정한 경우로서, 고정자의 형태가 완벽한 원이 아닌 경우나 회전자를 최초에 설치할 때 잘못된 위치에 고정시켰을 때 나타난다. 반면, 동적편심

은 축의 휨(*shaft bent*)이나 베어링 마모(*bearing wear*) 등에 의해 발생하는 것으로서, 그림 1 b)와 같이 회전자의 기하학적인 중심과 실제 회전자가 회전을 하게 되는 회전 중심이 일치하지 않는 경우를 말하며, 이 경우 공극이 최단거리가 되는 점이 회전자의 회전에 따라 회전을 하게 된다. 그러므로, 고정자나 회전자의 어떠한 위치에 고장이 발생하게 되면 고정자와 회전자 사이의 공극이 진동을 하게 되는 편심이 발생하게 되는데, 이러한 편심은 특정한 고장에 대해서 고유한 특성 주파수를 가지므로 이러한 편심을 전동기의 상태 감시에 사용할 수 있다.



a) 정적편심
a) Static eccentricity



b) 동적편심
b) Dynamic eccentricity

그림 1. 편심의 종류
Fig 1. The type of eccentricity

2.2 전류 스펙트럼

편심을 측정하는 방법은 여러 가지가 있으나 그 중 가장 간단한 방법은 앞에서 언급한 고정자 전류를 주파수 해석하는 방법이다. 즉, 편심이 발생하게 되면 편심에 따라 공극의 간격이 변하게 되어 전동기의 인덕턴스 성분에 영향을 주게 되므로, 고정자 전류 성분에 그 영향이 반영된다[5].

이러한 성질을 이용하여 공극의 편심과 회전자의 고장을 고정자 전류를 이용하여 측정하는 방법은 아래와 같이

$$f_{slot+ecc} = f_e \left[(kR \pm n_d) \left(\frac{1-s}{p/2} \right) \pm n_o \right] \quad (1)$$

를 이용한 방법이다[1,3,6].

여기서 f_e 는 공급되는 전류의 주파수, p 는 극점(*pole*)의 개수, R 은 슬롯(*slot*)의 수, n_d 는 편심의 차수, s 는 슬립(*slip*), $k = 1, 2, 3, \dots$ 이고, n_o 는 고정자 자기유도력(*magnetomotive force*)

의 고조파 성분(*high order frequency component*)이다.

그러나, 위의 방법은 식 (1)에서 볼 수 있듯이 슬롯의 개수와 같은 전동기 구조에 대한 지식을 필요로 한다. 그러나 다음과 같은 식을 이용하면, 전동기 구조에 대한 사전 지식 없이 회전자 고장의 검출이 가능하다[5].

$$f_{ecc} = |f_e \pm k \cdot f_{rm}| \quad (2)$$

여기서 f_{rm} 은 고장에 대한 편심의 특성 주파수이다.

위의 식 (1),(2)는 회전자 고장 검출에 쓰이고, 특정한 주파수로 진동을 하는 편심의 측정은 식 (3)에 의해 이루어진다.[5].

$$f_{ecc} = |f_e \pm k \cdot f_v| \quad (3)$$

여기서 f_v 은 고장에 대한 편심의 특성 주파수이다.

3. 속도 제어 유도전동기의 고장 검출 및 분류

마이크로프로세서(*microprocessor*)를 이용한 제어기술의 발달로 유도전동기에 대해서도 벡터 제어 등을 이용하여 직류전동기와 유사한 제어 성능을 얻을 수 있어 최근에는 기존의 직류전동기가 차지하고 있던 정밀 제어기나 소형의 서보모터까지 그 활용 범위가 확대되고 있다. 그림 2의 제어 구조를 가진 벡터 제어 유도전동기의 블록 선도에서 보면, 제어기의 출력을 전동기에 공급하는 인버터가 포함되어 있다. 인버터란 직류전원을 어떤 지령치를 따라가도록 변환시켜 주는 장치인데, 최근에 가장 많이 사용되는 전류 제어 인버터의 출력을 그림 3에서 나타내었다. 그림 3에서와 같이 인버터의 출력은 어떤 주어진 지령치를 히스테리시스밴드라는 일정한 범위 내의 오차 폭을 유지하며 따라가는 것을 알 수 있다. 따라서 인버터에 의해 고정자 전류는 톱날파와 유사한 파형을 가지게 되므로 주파수 해석을 하게 되면 원치 않는 고조파 하모닉 성분이 나타나게 되어, 고장의 징후를 나타내는 주파수가 나타나지 않게 된다. 즉, 인버터에 의해 고정자 전류에 포함되어 있는 전동기 상태에 관한 정보가 손상된다. 그러므로 단순히 고정자 전류만을 이용하면 정확한 고장의 검출 및 분류가 불가능하다.

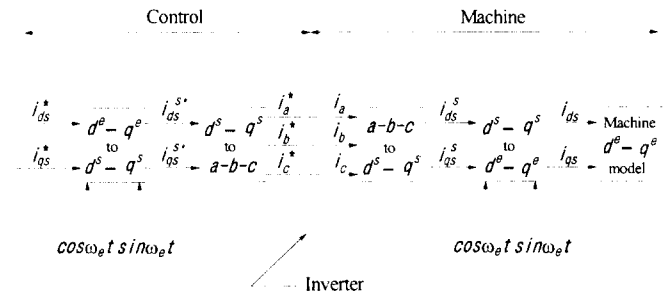


그림 2. 유도전동기의 벡터 제어
Fig 2. Vector control of induction motor

그러나 인버터를 통과하여 변형되기 전의 전동기 제어 입력 전류인 i_a^*, i_b^*, i_c^* 를 이용하면, 인버터에 의해 정보가 손상되지 않은 신호를 전동기의 상태 감시에 사용할 수가 있다. 특히,

제어 입력 전류는 제어 알고리즘에 의한 출력 즉, 디지털 데이터이므로, 제어 입력 전류를 계속 장치 없이 직접 디지털 데이터를 전송하는 선로를 통하여 고장 검출 및 분류를 수행하는 블럭으로 전달해 주면 되므로, 실제 운전 중인 전동기에 아무런 소프트웨어적 조정이나 부가적인 하드웨어의 장착이 없이 바로 병렬로 장착하여 수행이 가능하다. 그림 4에서 제안된 방법에 의한 고장 검출 및 분류를 위한 블럭 선도를 나타내었다. 즉, 주어진 전동기 시스템이 있을 때 제어기의 출력을 취하여 이를 주파수 해석한 후 이를 식 2), 3)을 이용하여 구할 수 있는 각 고장에 따른 특성 주파수를 관찰함으로써 시스템의 상태 감시와 고장이 발생하였을 때 고장 종류를 판별해 낼 수 있다.

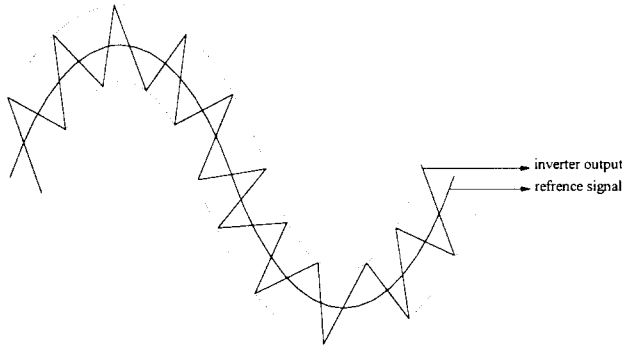


그림 3. 전류 제어 인버터
Fig 3. Current Controlled Inverter

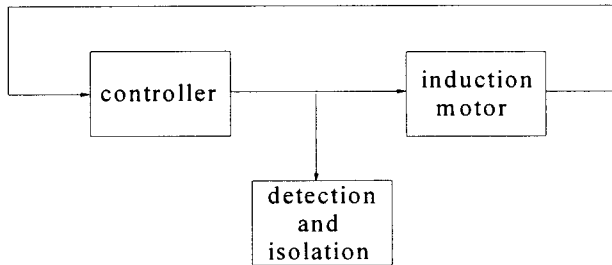


그림 4. 고장 검출 및 분류를 위한 블럭 선도
Fig 4. Block Diagram for Fault Detection and Isolation

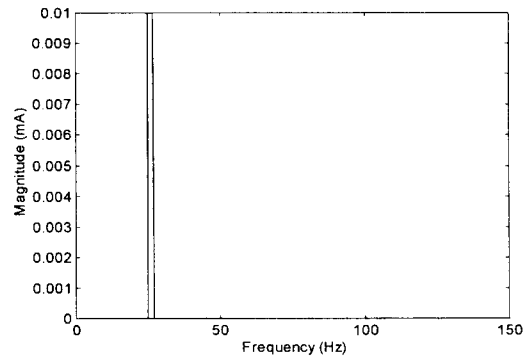
4. 모의 실험 결과

모의 실험은 아래의 표 1과 같은 사양을 가지는 유도전동기에 대하여 제어기를 달지 않은 상태에서의 정상 상태와 고장 상태에서의 고정자 전류의 주파수 특성을 보이고, 제어기를 단 상태에서의 고정자 전류와 제어 입력 전류의 주파수 성분의 비교를 통해 제어 입력 전류를 이용하여 제어기를 포함한 전동기에서 고정자 전류로는 검출이 불가능한 고장 상황을 성공적으로 검출할 수 있음을 보인다. 그림 5는 기존의 방법인 유도전동기의 고정자 전류를 이용한 정상 상태와 베어링 고장 시의 주파수 해석을 정속운행되는 유도전동기에 대하여 행한 것이고, 그림 6과 7은 벡터 제어방식의 유도전동기의 고장에 대하여 기존의 방법인 고정자 전류를 이용한 방법과 제안한 방법인 제어 입력 전류를 이용한 방법을 각각 다른 2가지 베어링 고장에 대하여 나타낸 것이다. 각각의 모의 실험에서 전동기의 속도는 1500rpm으로 제어하였다.

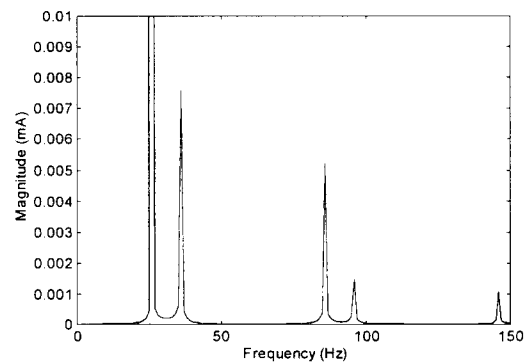
모의 실험 결과에서 알 수 있듯이 기존의 고정자 전류를 이용한 방법은 인버터를 사용하지 않는 정속주행을 하는 유도전동기에 대해서는 성공적으로 고장 검출과 분류가 되지만, 인버터를 사용하여 제어를 하는 유도전동기에서는 인버터의 영향으로 고정자 전류에 실려 있던 시스템의 상황에 대한 정보가 손실되어 고정자 전류로는 고장 검출 및 분류가 불가능하다. 그러나 인버터에 의해 제어가 되는 상태라 하더라도 인버터의 입력 신호 즉, 제어 입력 전류를 사용하면 성공적으로 고장 검출 및 분류를 행할 수 있다.

표 1. 사용된 전동기의 사양
Table 1. The spec. of used induction motor

출력	1/2 Kw
극수	2 개
관성 모멘트	0.0003 Kg·m ²
고정자 저항	5.55 Ω
회전자 저항	5.8 Ω
고정자 인덕턴스	0.476 mH
회전자 인덕턴스	0.476 mH
상호 인덕턴스	0.44 mH

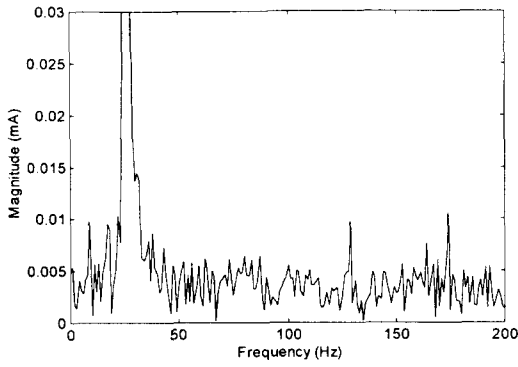


a 정상상태
a) Normal state

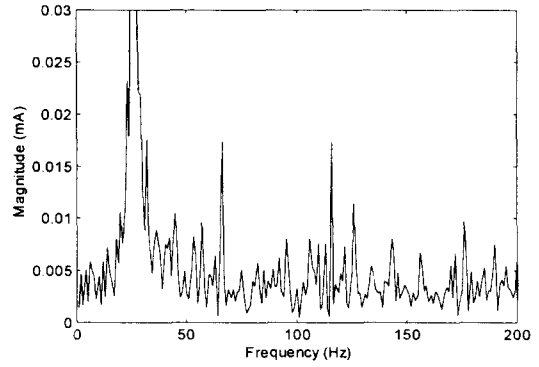


b 베어링의 내측 고장
b) Bearing inner race fault

그림 5. 3상 전압인가 시의 유도전동기의 주파수 해석
Fig 5. Frequency analysis of stator current in 3-phase voltage

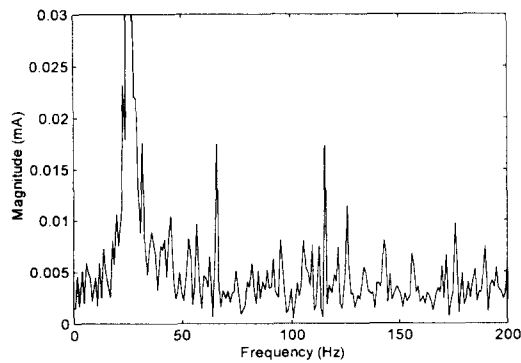


a) 고정자 전류의 주파수 해석
a) Frequency analysis of line current



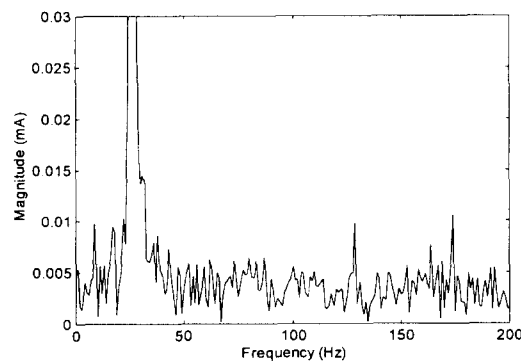
b) 제어 입력 전류의 주파수 해석
b) Frequency analysis of control reference current

그림 7. 볼베어링의 내측 고장
Fig 7. Inner race fault of bearing



b) 제어 입력 전류의 주파수 해석
b) Frequency analysis of control reference current

그림 6. 볼베어링의 외측 고장
Fig 6. Outer race fault of bearing



a) 고정자 전류의 주파수 해석
a) Frequency analysis of line current

6. 결 론

본 연구에서는 제어기를 포함한 유도전동기에서 제어 입력 전류를 이용한 고장 검출 및 분류 알고리즘을 제안하고, 이를 두 가지 다른 종류의 베어링 고장에 대한 모의 실험을 통하여 그 성능을 입증하였다. 앞으로의 연구과제는 제안한 방법을 실제의 유도전동기에 적용하는 것이다.

참 고 문 헌

- [1] J. R. Cameron, W. T. Thomson and A. B. Dow, "Detecting Airgap Eccentricity in Large Induction Motors," *IEE Proc.*, vol. 133, Pt. B, No 3, pp. 155-163, 1986.
- [2] S. F. Farag, R. G. Bartheld and T. G. Habetler, "An Integrated On-Line Motor Protection System," *IEEE Industry Appl. Magazine*, April, pp. 21-26, 1996.
- [3] N. M. Elkasabgy, A. R. Eastham and G. E. Dawson, "Detection of Broken Bars in the Cage Rotor on an Induction Machine." *IEEE Trans. on Industry Appl.*, Vol. 28, No. 1, pp. 165-171, 1992.
- [4] G. B. Kliman, R. A. Koegl, J. Stein, R. D. Endicott and M. W. Madden, "Noninvasive Detection of Broken Rotor Bars In Operating Induction Motors," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 3, No. 4, pp. 873-879, 1988.
- [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 Appl.*, Vol. 31, No. 6, pp. 1274-1279, 1995.
- [6] P. Vas, *Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines*, Oxford Science Publications, Oxford, 1993.