

특집 : 전동기 고장진단

고주파 신호 주입을 이용한 인버터 구동 유도전동기 진단 및 상태 추정

석 줄 기

(영남대 전기공학과 부교수)

종래의 유도전동기 고장 진단 및 상태 추정 기술은 주로 센서에 의존하여 진행되었는데, 이는 추가적인 비용을 발생시킬 뿐만 아니라 센서 장착의 문제와 센서 오동작에 의한 잦은 오경보(false alarm)를 유발하는 문제가 있다. 최근에는 이런 문제 때문에 부가적인 하드웨어 없이 운전 중에 필요한 정보를 분석하거나 고주파 신호를 주입하여 유도전동기 고장을 진단하는 기술이 활발히 연구되고 있다. 본 기고에서는 최근 연구되고 있는 Non-invasive 방식의 유도전동기 진단 및 상태 추정 기법들을 소개하고자 한다.

1. 서론

1970년대 이후 반도체 소자의 비약적인 발전과 고성능 프로세서의 출현, 그리고 자속기준 제어 기술로 대표되는 제어 기술의 발전 등으로 유도전동기는 직류전동기를 대체하여 산업계에서 가장 널리 사용되어 왔다. 유도전동기의 사용 영역이 넓어지고 PWM 인버터를 장착한 유도전동기의 역할이 전체 공정에서 중요해짐에 따라 최근에 유도전동기의 고장 진단 및 수명에 직접적인 영향을 주는 온도 추정 및 고장 진단에 대한 관심이 증가하고 있다.

유도전동기의 고장은 각 구성품에서 발생 가능하며 제조 공정의 불량과 반복적인 운전 및 열악한 환경 등에 의해 다음과 같은 고장이 발생할 수 있다.

(1) 고정자 권선의 단락 혹은 개방

- (2) 고정자 권선의 비정상적인 연결
- (3) 회전자 바의 파손 및 엔드링(End-ring) 파손
- (4) 베어링의 파손에 의한 정적 또는 동적 에어 갭 편심
- (5) 축 변형
- (6) 회전자 권선의 단락

Motor Reliability Working Group (MRWG)⁽¹⁻²⁾과 Electric Power Research Institute (EPRI)⁽³⁾의 조사에 의하면 전동기 고장은 베어링 관련 고장이 약 44%, 고정자 권선의 단락이 약 26%~36%, 회전자 관련 고장이 약 8%~9%, 기타가 22% 정도 차지하는 것으로 나타났다. 베어링 및 고정자와 회전자 관련 고장이 전동기 고장에 80% 정도를 차지하고 있어 대부분의 고장 진단 알고리즘은 이 세 가지를 대상으로 개발되어 왔다. 특히, 회전자 관련 고장 빈도는 약 8%~9% 정도이지만 고장이 발생할 경우 토크 리플이 발생하고 평균 토크가 줄어들며, 효율이 나빠지고 열이 발생하는 등 유도전동기 운전 시 심각한 악영향을 미치는 특성이 있다⁽⁴⁻⁶⁾. 농형 유도전동기 회전자는 외장 센서조차도 부착할 수가 없기 때문에 그 상태나 진단을 수행하기가 더욱 어렵다.

이러한 유도전동기 고장은 사용자의 안전을 위협하고 유도전동기와 연결된 다른 기계적 부품의 2차 고장을 유발하며 예측하지 못한 전체 공정의 정지로 인한 막대한 경제적 손실을 가져온다. 따라서 이러한 고장이 일어나지 않도록 유도전동기 상태를 모니터링하고 고장 발생 요인을 미리 제거하는 것이 중요하다. 특히, 유도전동기 회전자 고장 발생의 가장 중

요한 요인 중의 하나는 전동기 내부의 비정상적인 온도 상승이다. 유도전동기 회전자자의 급격한 온도 상승은 회전자 바의 열 스트레스(Thermal stress)으로 인한 바의 파손 또는 엔드링의 파손으로 연결될 수 있다. 고정자와 달리 회전자는 직접 온도를 측정하기 어렵기 때문에 회전자 온도를 추정하여 비이상적인 회전자 온도 상승을 막을 수 있다면 유도전동기의 회전자 고장을 사전에 예방할 수 있다.

2. 회전자 온도 추정

회전자의 비정상적인 온도 상승을 차단하기 위하여 유도전동기를 사용하는 산업체에서는 회전자에 온도에 따라 색깔이 변하는 페인트를 코팅하여 회전자자의 비정상적인 온도 상승을 유추한다든가 고정자 권선 또는 권선 주위의 온도를 측정하여 고장 신호를 발생하는 방법들이 사용하여 왔다. 그러나 이러한 방법들은 유도전동기를 분해해야하는 번거로움이 있고 유도전동기 운전 중에 변하는 회전자자의 정확한 온도를 알 수 없기 때문에 효과적인 유도전동기 온도 상승 예방이 어렵다.

좀 더 정확한 회전자 온도 추정 방법으로 DC 신호를 주입하는 방법이 제안되었다⁽⁶⁾. 이 방법은 비교적 정확한 회전자 온도를 추정할 수 있고 전동기 상수와 무관한 장점이 있으나 DC 신호를 주입할 부가적인 하드웨어가 필요하고 주입된 신호가 전동기에 불필요한 토크 리플을 발생시키는 문제가 있다.

열 모델(Thermal model) 또는 회전자 저항 추정을 통한 유도전동기의 회전자 온도 추정 방법이 제안되기도 하였다⁽⁷⁾. 그러나 이 방법들은 온도 조건의 변화에 영향을 받아 부정확한 결과를 도출하거나 고정자 저항의 오차에 매우 민감한 단점들이 있다.

최근에 기존의 방법과 다르게 AC 신호를 주입하여 회전자 온도를 추정하고자 하는 방법들이 시도되었다^(8,9). 그러나 이 방법은 주입 신호의 주파수가 기본과 주파수와 너무 가까워 주입 신호의 주파수 성분을 효과적으로 추출하기 어려우며 주입된 신호로 인한 토크 리플이 발생할 수 있다. 또한 이 방법들은 자기적인 포화에 의해 변하는 전동기의 인덕턴스를 정확히 알아야하는 단점도 있다.

3. 회전자 고장 진단

현재 산업계에서는 유도전동기 회전자 고장을 진단하는 다양한 방법들이 있다. 대표적인 방법으로 초음파 검사, 그라owler(Growler)를 이용한 검사 등이 있다.

초음파 검사는 그림 1에서 보는 것처럼 회전자자의 축에 초음파 신호를 주입하여 회전자 바 또는 엔드링의 기포 존재 유무

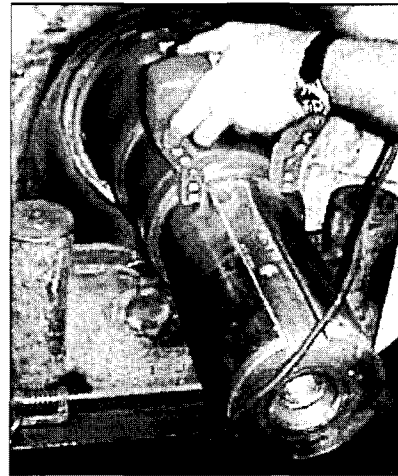


그림 1 회전자 고장 진단을 위한 초음파 테스트

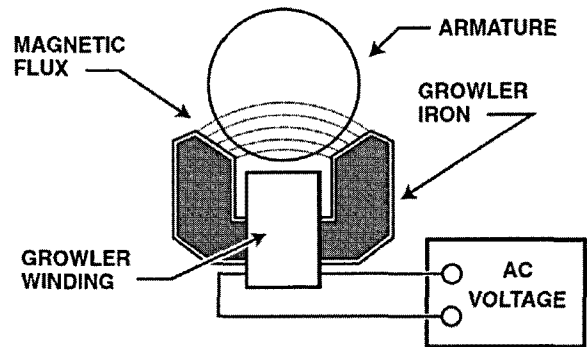


그림 2 회전자 고장 진단을 위한 그라올러 테스트

를 비롯한 회전자 고장을 진단할 수 있다. 그라올러를 이용한 검사는 그림 2에서처럼 유도전동기 회전자를 그라올러 위에 올려놓고 그라올러에 AC전원을 인가하여 회전자 고장을 진단한다. 그라올러에 AC전원이 인가되면 자속이 발생되고 이 자속에 의해 유도전동기 회전자에 전류가 유도된다. 이 때 유도전동기 회전자 위에 솟가루가 뿌려져 있는 얇은 종이를 올려놓으면 유도전동기 회전자 바의 전류에 의해 발생된 자속이 솟가루를 회전자 바의 길이 방향으로 정렬시킨다. 그러나 회전자 바 및 엔드링의 파손이 있으면 회전자 바에 전류가 흐르지 않게 되고 종이 위에 솟가루의 정렬현상이 나타나지 않게 된다. 이러한 방법으로 회전자를 천천히 돌리면서 전체 회전자 바 및 엔드링의 고장유무를 검사할 수 있다.

그러나 산업계에서 많이 사용되는 이러한 방법들은 유도전동기를 분해하여야만 하기 때문에 정상적인 전동기 운전에 심각한 악영향이 발생하여 회전자 고장이 의심될 때 사용되어진다. 따라서 실시간 회전자 고장 모니터링이 불가능하여

초기 고장 진단이 어렵다. 이러한 이유로 초기 고장 진단을 위한 실시간 고장 모니터링 기술에 대한 연구가 활발히 진행되었다.

과거에 실시간 고장 진단 기술은 주로 센서에 의존하여 진행되었는데, 센서 장착과 비용 문제로 부가적인 하드웨어 없이 운전 중에 필요한 정보를 분석하거나 고주파 신호를 주입하여 유도전동기 회전자 고장을 진단하는 기술이 활발히 연구되고 있다.

모델에 무관하게 고장을 진단하는 방법 중 대표적인 것이 전동기 전류 신호 분석(Motor Current Signature Analysis, MCSA) 방법 등이 있다. 이 방법들은 전동기 동특성을 요구하지 않으므로 전동기에 대한 사전 정보 없이 다양한 전동기에 대해 비교적 정확한 고장 진단 성능을 보여주지만, 부하에 의한 고정자 전류 스펙트럼을 분석해야 하므로 방대한 연산 및 메모리, 정확한 슬립 정보와 충분한 크기의 부하를 요구하는 단점이 있다.

4. 고주파 신호 주입에 의한 온도 추정 및 고장 진단

4.1 회전자 온도 추정

회전자 바의 온도가 상승하게 되면 회전자 저항이 커지게 되고 이 때문에 고정자 자속의 쇄교로 유도되는 회전자 전류가 감소하게 된다. 회전자 전류가 감소하게 되면 회전자 바에 흐르는 전류에 의한 회전자 바 내부의 유도 기전력이 감소하게 되고 이는 회전자 바의 표면에 흐르는 고주파 전류가 회전자 바의 내부로 흐를 수 있게 한다. 회전자 전류가 회전자 바의 내부로 흐를수록 그림 3과 4에서 볼 수 있듯이 고정자와의 거리는 멀어지게 되고 이것은 회전자 누설 자속의 증가를 야기한다. 결국 회전자 온도 상승은 회전자 저항의 증가를 가져오므로 회전자 전류가 줄어들게 되면 회전자 전류가 회전자 바 내부로 흐르게 되어 누설 자속의 증가, 즉 누설 리액턴스를 증가시킨다⁽¹⁰⁾. 고주파 신호 주입 방법은 주입된 전압에 의한 발생 전류로부터 누설리액턴스 혹은 회전자 저항의 변동을 추정하여 온도 변동을 감지하게 된다.

그림 5는 간헐적인 고주파 전압 주입에 의한 회전자 온도 추정 블록도를 보여준다. 고주파 전압은 동기 좌표계 d축에 간헐적으로 주입되며 이 때 발생한 고주파 전류는 전류 제어 시 대역차단 필터(BSF)에 의해 차단되며 대역통과 필터(BPF)를 이용해 동기 좌표계에서 고주파 전류만 추출하여 유도전동기 회전자 온도 추정에 이용한다. 대역통과 필터에 의해 추출된 고주파 전류는 오프라인으로 추정된 위상 오차를 보상하고 등가 리액턴스를 구하게 되며 여기에 부하 변화에 대한 고정자 누설 리액턴스의 값을 보상하여 최종적으로 유도전동기 회전자 온도를 추정하게 된다.

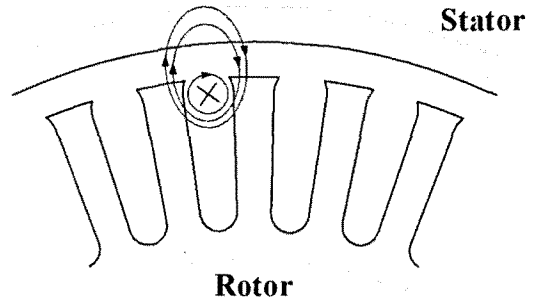


그림 3 회전자 온도가 낮은 경우 누설 자속 분포

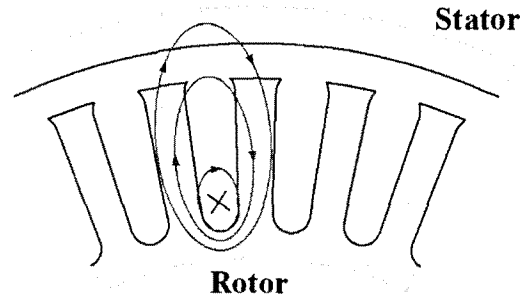


그림 4 회전자 온도가 높은 경우 누설 자속 분포

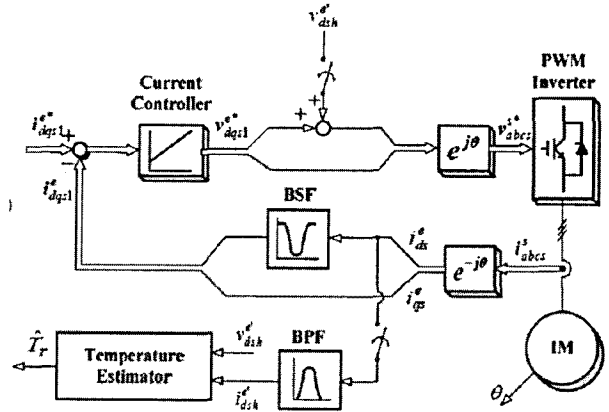


그림 5 고주파 전압 주입에 의한 온도추정 방법

4.2 회전자 고장 진단

회전자 고장은 알루미늄 다이캐스팅 바 내부의 기포, 동 바와 엔드링 사이의 용접 불량 등 제작과정의 결함, 전동기 회전에 따른 원심력, 가감속 운전 때 온도 상승, 전원의 불평형 또는 공극의 편심 때문에 발생하는 불균형적인 힘의 분포 등에 기인하며 결국 이는 회전자 바 혹은 엔드링의 파손으로 나타난다.

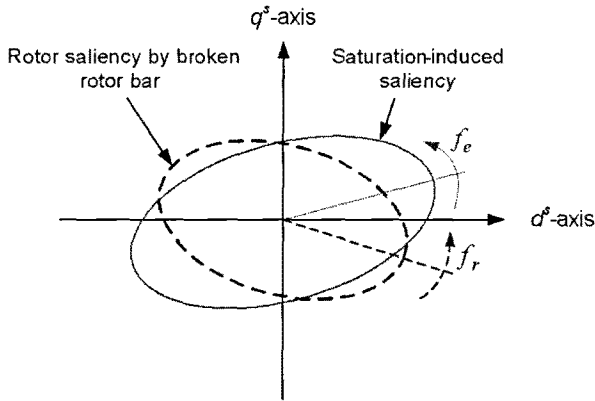


그림 6 정지좌표계의 전동기 돌극성

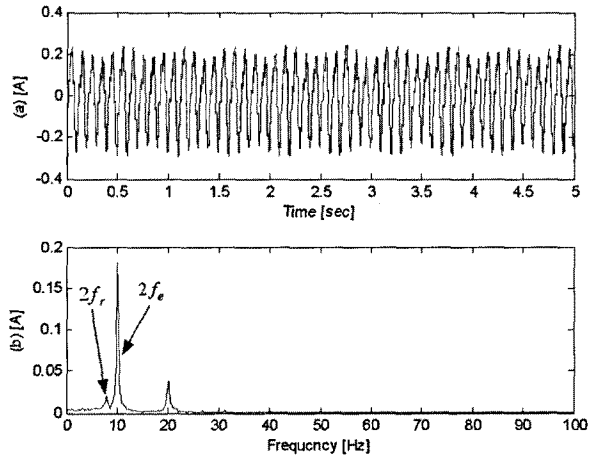


그림 7 40% 부하에서 측정된 고주파 전류 (회전자 바 2개 파손). (a) 돌극성을 포함하는 고주파 전류. (b) (a)의 FFT.

회전자에 고장이 발생하게 되면 회전자는 전기적으로 비대칭적인 구조를 가지게 되고 이것이 돌극성을 발생시키게 된다. 회전자 바의 파손 또는 엔드링의 파손으로 회전자 바에 전류가 흐르지 않게 되었을 때 고정자 권선에 의해 발생한 자속이 이 바를 지나게 되면 모두 누설 자속이 된다. 따라서 회전자 고장이 있는 지점의 누설 인덕턴스가 최대가 되고 회전자 고장 지점으로부터 90° 위치에서 누설 인덕턴스가 최소가 되는 그림 6과 같은 타원 형태의 누설 인덕턴스의 모양(적색)을 가지게 된다.

전동기 내부에는 고장이 없더라도 자속포화에 의한 돌극성(그림 6의 청색 타원)이 항상 존재한다. 고주파 전압을 주입하면 발생 전류에 이 두 가지 돌극성 성분이 모두 나타나게 되는데, 경부하의 경우 두 타원이 근접하게 되어 신호 추출이 어렵게 되는 문제가 있다.

그림 7에 40% 부하 인가시 고주파 전압 주입에 의한 측정 전류 주파수 분석 결과를 도시하였다. 스펙트럼 분석 결과 그림 6에 나타난 두 가지 돌극성 성분이 나타남을 확인할 수 있다.

따라서, 전류에 나타나는 두 돌극성 성분을 분리하기 보다는 고장이 발생했을 때 생기는 누설인덕턴스의 변동을 감지하는 것이 부하에 무관하게 고장을 진단할 수 있는 방법이다. 이는 별도의 스펙트럼 분석없이 시간 영역의 데이터를 이용하여 쉽게 진단을 내릴 수 있다^[10].

5. 결론

본 기고에서는 최근까지 연구된 유도전동기 온도추정 및 고장 진단 방법 및 동향에 대하여 소개하였다. 유도전동기는 내구성, 경제성, 고효율 등의 특징 때문에 산업 전반에 광범위하게 사용되어지고 있다. 따라서 생산성 향상과 전동기 및 주변장치의 피해를 최소화하기 위해 온도 상승 방지 및 초기 고장 진단 기술이 필요하다. 특히, 회전자 온도 추정 및 고장 진단은 회전자의 물리량을 직접 측정할 수 없고 고장 발생 시 정상적인 운전에 심각한 악영향을 미치기 때문에 매우 중요하다. 본 기고에서는 고주파 전압을 주입하여 회전자 온도 추정 및 고장 진단 방법을 주로 소개하였다. 제시된 방법은 전동기 모델에 무관하게 운전 조건에 거의 영향을 주지 않고 최소한의 손실로 만족할 만한 추정 및 진단 성능을 보여준다.

참고문헌

- [1] MOTOR RELIABILITY WORKING GROUP., "Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations, part I" IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. IA-21, Jul/Aug. 1985, pp. 853-864.
- [2] MOTOR RELIABILITY WORKING GROUP., "Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations, part II" IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. IA-21, Jul/Aug. 1985, pp. 865-872.
- [3] P. F. Albrecht, J. C. Appiaris, and D. K. Sharma, "Assessment of the reliability of motors in utility applications - updated," IEEE Trans. Energy Convers., Vol. EC-1, Mar. 1986, pp. 39-46.
- [4] S. Nandi, H. A. Toliyat, and X. Li, "Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors

- a review," IEEE Trans. Energy Convers., Vol. 20, Dec. 2005, pp. 719-729.
- [5] R. R. Obaid, Detection of rotating mechanical asymmetries in small induction machines Ph. D. Dissertation, Georgia Institute of Technology, U. S., 2002.
- [6] S. B. Lee and T. G. Habetler, "An online stator winding resistance estimation technique for temperature monitoring of line-connected induction machines," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 39, no. 3, May/June. 2003, pp. 685-694.
- [7] C. Kral, T. Habetler, R. Harley, F. Pirker, G. Pascoli, H. Oberguggenberger, and C. Fenz, "Rotor temperature estimation of squirrel-cage induction motors by means of a combined scheme of parameter estimation and a thermal equivalent model," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 40, Jul./Aug. 2004, pp. 1049-1057.
- [8] Y. Wu and H. Gao, "Induction-motor stator and rotor winding temperature estimation using signal injection method," IEEE Trans. Ind. Appl., vol.42, Jul./Aug. 2006, pp.1038-1044.
- [9] F. Briz, M. W. Degner, J. M. Guerrero, and A. B. Diez, "Temperature estimation in inverter fed machines using high frequency carrier signal injection," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol.44, May/June. 2008, pp.799-808.
- [10] 조경래, "고주파 전압 주입에 의한 인버터 구동 유도전동기의 회전자 상태 추정과 진단에 관한 연구," 영남대학교 박사학위 논문, 2009.

〈 필 자 소 개 〉



석줄기(石 줄 기)

1969년 3월 29일생. 1998년 서울대 대학원 전기공학부 졸업(공학박). 1998년~2001년 삼성전자 생산기술센터 자동화연구소 책임연구원. 현재 영남대 전기공학과 부교수.