인버터 입력전류 분석을 이용한 유도전동기 고장진단

한정호^{1*}, 송중호², 최규형¹ ¹서울과학기술대학교 철도전기신호공학과, ²서울과학기술대학교 전기정보공학과

Diagnosis of Induction Motor Faults Using Inverter Input Current Analysis

Jungho Han^{1*}, Joong-Ho Song², Kyu-Hyoung Choi¹ ¹Department of Railway Electrical and Signaling Engineering, Seoul National University of Science and Technology ²Department of Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology

요 약 운전 중인 유도전동기에 고장이 발생하면, 구동장치 등 전체 시스템에 2차적인 고장을 유발 시킬 수 있다. 이 경우 구동시스템의 신뢰도와 안전성이 저하되고, 경제적인 손실을 초래할 뿐만 아니라, 인명 피해의 위험 등 많은 문제가 발생할 수 있다. 따라서 유도전동기의 고장징후를 조기 감지하여 전체 시스템 고장을 방지할 수 있도록 하는 유도전동기 고장진단 방법이 필요하다. 본 논문은 유도전동기에서 고정자권선의 부분 단락과 회전자 바의 균열이 발생하는 경우, 인버터 입력전류 를 분석하여 고장징후를 조기 감지하는 유도전동기 고장진단 방법을 제안한다. 제안한 고장진단 방법은 고정자 전류 3개를 모두 센상해야 하는 기존 고장진단 방법과 달리, 인버터 입력전류 센서 한 개만으로 유도전동기 고장진단이 가능하다. 또한, 정상전류 주파수성분과 고장전류 주파수성분이 서로 분리되어 나타나는 인버터 입력전류 특성을 통해 기존 고장진단 방법보 다 비교적 쉽고 확실한 고장진단이 가능하다. 시뮬레이션을 통하여 제안한 유도전동기 고장진단 방법의 우수성과 유효성을 확인한다.

Abstract It is well known that since abrupt faults in induction motors tend to lead to subsequent faults and deterioration of the drive apparatus, motor faults may lead to several operating restrictions, such as security problems and economic loss. A lot of research has been done in the area of diagnosis to detect machine faults and to prevent catastrophic hazards in the motor drive system. This paper presents a new method of motor current signature analysis in which the DC-link current of the inverter-driven induction motor system, where a single current sensor is employed instead of three AC current sensors, is measured, and fast Fourier transform analysis is performed. This proposed method makes it possible to easily discern and clearly separate the motor fault current signature from the normal operation current flowing through the stator and rotor windings.

Keywords : Dc-link current, Fault diagnosis, induction motors, inverter, motor current signature analysis

1. 서론

제어를 위한 구동장치 비용이 저렴하다는 장점 때문에
폭넓게 사용되고 있다. 유도전동기의 고장 발생 후 유지
도 보수하는 방법은 구동장치를 사용하는 전체 시스템에 대

유도전동기는 대용량 구성이 용이하고 토크 및 속도

본 논문은 국토교통과학기술진흥원에서 시행하는 상태기반 스마트 유지보수 핵심기술 개발 연구(과제번호 : 13RTRP-C068243-01)의 일환으로 수행되었습니다. *Corresponding Author : Jungho Han(Seoul National University of Science and Technology) Tel: +82-10-4624-1298 email: hanston@seoultech.ac.kr Received June 3, 2016 Revised (1st July 1, 2016, 2nd July 4, 2016, 3rd July 6, 2016) Accepted July 7, 2016 Published July 31, 2016 한 신뢰도 및 안전성을 저하시키고, 경제적인 손실을 초 래할 뿐만 아니라, 인명 피해의 위험 등 많은 문제를 발 생시킬 수 있다. 이러한 이유로, 유도전동기의 고장징후 를 조기 감지하여 고장발생 전 유지 보수를 통하여 예방 정비가 이루어질 수 있도록 하는 고장진단 방법이 필요 하다. 유도전동기의 고장은 고정자 권선의 단락이나 개 방으로 인한 고정자 고장, 고정자 권선의 잘못된 결선, 회전자 바 고장, 공극 편심, 베어링 또는 기어 박스 고장 으로 분류할 수 있으며, 이러한 고장으로 인해 불균일한 공극전압, 토크 맥동 성분 증가, 평균 토크 감소, 전동기 효율 감소, 발열 등이 발생된다[1]. 이와 같은 증상들은 유도전동기 구동장치의 2차적인 고장으로 확산될 수도 있다. 이러한 이유로, 손쉽게 유도전동기의 고장징후를 조기 감지하여 고장발생 전에 유지 보수를 가능하게 하 는 효과적인 고장진단 방법이 필요하다.

일반적으로 유도전동기의 고장진단을 위하여 온도, 진동, 전기적 감시기법 등이 사용되고 있다[2-5]. 온도나 진동 감시 기법이 기기의 상태를 평가하기 위하여 사용 되고 있지만 감지기기 자체의 고장이 일어나기 쉽고, 비 용이 비싸기 때문에 전기적인 고장을 진단하는데 제한이 있다[3]. 최근에는 공극의 자속 변화를 이용하여 진단하 는 방법이 연구 되었으나 공극 자속 측정을 위해서는 유 도전동기의 고정자 슬롯에 자속을 측정할 수 있는 센서 를 삽입해야 하므로 운전 중인 유도전동기의 진단에는 적합하지 않다[4]. 또한, 임의의 시그널을 발생시켜 그 변화 추이를 측정하여 고장을 진단하는 시그널 인젝션 방법이 연구되었지만, 고정자 전류에 고조파를 발생시키 는 등 문제점을 가지고 있다[5]. 반면에, MCSA(motor current signature analysis) 기법은 운전 중인 유도전동 기의 전류 신호를 간단하게 측정하여 유도전동기 고장진 단이 가능한 방법이다[6-8].

일반적인 MCSA 기법은 유도전동기에 공급되는 고정 자 전류를 FFT(fast fourier transform) 분석을 통해 진단 하는 방법을 사용한다. 하지만, 이러한 방법은 전류센서 3개를 사용해야 하고, 정상전류 주파수성분 근처에 고장 전류 주파수성분이 존재하므로 고장 판별이 어려운 단점 이 있다. 이러한 이유로, 본 논문은 유도전동기에서 흔히 발생하는 고정자 권선 부분 단락과 회전자 바 균열에 대 하여 인버터 입력전류 분석을 통하여 진단하는 방법을 제안한다. 제안한 고장진단 방법은 인버터 입력전류만 센싱하면 되므로 전류센서를 한 개로 줄일 수 있다. 또 한, 정상전류 주파수성분과 고장전류 주파수성분이 서로 분리되어 나타나는 인버터 입력전류 특성을 통해 쉽게 고장진단이 가능하다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서 정상동작 시와 고장 시 나타나는 고정자전류의 주파수 성분을 해석한다. 3장에서는 기존의 고장진단 방 법과 제안한 고장진단 방법의 차이점을 분석한다. 4장에 서는 시뮬레이션을 통해 기존의 고장진단 방법과 제안한 고장진단 방법을 비교하여 제안한 유도전동기 고장진단 방법의 우수성과 유효성을 확인한다.

2. 유도전동기 고장주파수 해석

2.1 정상동작 시

Fig. 1은 정상동작 시 유도전동기 전류를 나타낸다. 고정자에 공급되는 전류 주파수가 f^s 라면 회전자에 흐 르는 전류 주파수는 sf^s 이다. 여기서, s는 슬립이다.



Fig. 1. Induction motor current (normal condition)

식 (1)은 정상시 유도전동기의 전압, 전류 관계를 정 상상태 값으로 나타내고 있다.

$$\begin{bmatrix} V_s \\ V_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_s + jX_s) & jX_m \\ jX_m & (R_r/s + jX_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix}$$
(1)

여기서, V_s , V_r 은 각각 고정자 전압, 회전자 전압을 나 타내고, 회전자 전압의 값은 0이다. 또한, I_s , I_r 은 각각 고정자 전류, 회전자 전류를 나타낸다. R_s , X_s 는 고정 자의 저항과 리액턴스를 나타내고, R_r , X_r 은 회전자의 저항과 리액턴스를 나타낸다. X_m 은 유도전동기의 자화 리액턴스 값이다. 정상동작 시 고정자전류는 유도전동기 회전방향과 같은 정상분만 발생한다.

2.2 고정자 권선 부분단락 고장 시

Fig. 2는 고정자 권선 부분단락 고장 시 유도전동기 전류를 나타낸다. 고정자 권선 부분단락 이 발생하면 고 정자에 흐르는 전류에 *f^s* 주파수 성분뿐만 아니라 − *f^s* 주파수를 갖는 역상분 전류가 나타나게 된다.



Fig. 2. Induction motor current (stator fault condition)

식 (2)는 고정자 권선 부분단락 고장 시 고정자전류에 발생하는 고장전류 주파수 성분을 나타낸다.

$$f_{fault}^s = -f^s \tag{2}$$

식 (2)로부터 고정자 권선 부분단락 고장 시 고정자전 류에는 정상동작 시 흐르는 고정자전류와 주파수 성분이 동일한 전류가 발생하는 것을 알 수 있다. 단, 정상동작 시 발생하는 전류는 정상분 성분이고, 고정자 권선 부분 단락 고장 시 발생하는 전류는 역상분 전류이다. 이러한 특성으로 인해 기존의 고정자전류 측정을 통한 고장판별 기법은 FFT 분석 시 정상분 주파수 성분과 역상분 주파 수 성분이 겹쳐있게 되므로 고정자 권선 부분단락 고장 을 판별하는데 문제점을 가지고 있다.

2.3 회전자 바 균열 고장 시

Fig. 3은 회전자 바 균열 고장 시 유도전동기 전류를 나타낸다. 회전자 바 균열 고장이 발생하면 회전자에 흐 르는 전류에 *sf^s* 주파수 성분뿐만 아니라 - *sf^s* 주파 수를 갖는 역상분 전류가 나타나게 된다.



Fig. 3. Induction motor current (rotor fault condition)

회전자에 - sf^s 주파수를 갖는 역상분 전류가 나타 날 때, 고정자 전류에 발생하는 주파수 성분은 다음과 같 이 나타낼 수 있다. 먼저, 식 (3)은 정상분 전류와 유도전 동기의 회전 주파수 관계를 나타낸다.

$$f_m = f^s - sf^s = (1 - s)f^s$$
(3)

여기서, f_m 은 유도전동기 회전 주파수를 나타낸다. 또 한, 역상분 전류와 유도전동기의 회전 주파수 관계는 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$f_m = f_{fault}^s - (-sf^s) \tag{4}$$

여기서, f_{fault}^s 는 회전자 바 고장시 고정자 전류에 나타 나는 전류 주파수 성분이다. 식 (3), (4)를 정리하면, f_{fault}^s 를 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{split} f^{s}_{fault} &= f_{m} - s f^{s} \\ &= (1-s) f^{s} - s f^{s} = (1-2s) f^{s} \end{split} \tag{5}$$

식 (5)로부터 회전자 바 균열 고장 시 고정자 전류에 (1-2s)f^s의 주파수를 갖는 성분이 발생하는 것을 알 수 있다. 다시 말해, 이 성분은 회전자 바 균열 고장 시 고정자에 발생하는 역상분 성분이며, 보통 슬립의 범위 는 5% 이내 이므로 고정자전류 정상분 주파수 성분과 매우 근접하여 발생한다. 이러한 특성으로 인해 기존의 고정자전류 측정을 통한 고장판별 기법은 FFT 분석 시 정상분 주파수 성분과 회전자 고장 주파수 성분이 매우 근접하게 위치함으로 회전자 바 균열 고장을 판별하는데 문제점을 가지고 있다.

3. 제안한 고장진단 방법

Fig. 4는 인버터로 구동되는 유도전동기 회로를 나타 낸다. 기존의 고장진단 방법은 고정자전류 *I_a*, *I_b*, *I_c를* 검출하여 FFT 분석을 통해 고장을 진단하는 방법을 이 용하였다. 하지만, 이러한 고장진단 방법은 2장에서 언 급한 바와 같이 고정자 권선 부분단락 고장 시 정상분 주파수 성분과 역상분 주파수 성분이 겹쳐있거나, 회전 자 바 균열 고장 시 정상분 주파수 성분과 회전자 고장 주파수 성분이 매우 근접하게 위치함으로 고장진단 판별 에 문제점을 가지고 있다. 반면에 인버터 입력전류 *I_{in}* 을 검출하여 저역통과필터를 통과시키면 고주파 전류 성 분을 제거하고 정상전류와 고장전류 검출이 가능하고, FFT 분석 통해 정상전류 성분과 고장전류 성분이 분리 되어 나타나는 것을 알 수 있다.



Fig. 4. Induction motor operation circuit



Fig. 5. Relation of Stator current and inverter input current

Fig. 5는 고정자 전류 I_a , I_b , I_c 와 인버터 입력전류 I_{in} 의 관계를 나타낸다. 고정자 권선 부분단락(적색)과 회전자 바 균열(녹색) 고장 시 고정자전류를 FFT 분석해 보면, 고장 성분이 정상전류 성분(청색)과 겹쳐있거나 인 접해 있는 것을 볼 수 있다. 하지만, 인버터 입력전류를 FFT 분석하면 고장성분은 $2f_s$ 와 그에 인접한 주파수영 역으로 이동하고 정격전류 성분은 직류성분 영역으로 이 동하는 것을 볼 수 있다. 이는 한 개의 전류센서 만으로 고정자 권선 부분단락 고장과 회전자 바 균열 고장을 진 단 할 수 있는 방법이다.

4. 시뮬레이션

3장에서 제안한 인버터 입력전류를 이용한 유도전동 기 고장진단 방법을 이용하여 권선 부분단락 고장과 회 전자 바 균열 고장을 판별하고, 기존 고정자전류를 통한 고장진단 방법과 비교한다. 시뮬레이션 상황은 첫 번째 로, 정상동작 시 유도전동기 고정자전류와 인버터 입력 전류의 FFT 분석 결과를 보여준다. 두 번째로, 유도전동 기에 고정자 권선 부분단락 고장이 발생했을 때 유도전 동기 고정자전류와 인버터 입력전류 FFT 분석 결과를 보여준다. 세 번째로, 회전자 바 균열 고장이 발생했을 때 유도전동기 고정자전류와 인버터 입력전류 FFT 분석 결과를 보여준다. 각 시뮬레이션의 인버터 입력전류는 정상전류와 고장전류 주파수 영역인 0~200Hz를 보기 위하여 1kHz 차단주파수를 갖는 저역통과필터를 거친 파형이다. Table 1은 유도전동기 고장진단 시뮬레이션 파라미터를 나타낸다.

Parameter	Value
nominal power	282HP
nominal voltage	1100Vrms
nominal current	135Arms
nominal frequency	75Hz
nominal slip	1.8%
power factor	89%
efficiency	92%
stator resistance	89mΩ
rotor resistance	60mΩ
magnetizing reactance	42.4 Ω
stator reactance	1.7Ω
rotor reactance	1.7Ω

Table 1. Simulation parameter

Fig. 6은 정상동작 시 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 2 장 내용과 같이 고정자전류는 정격크기와 주파수에 맞는 특성으로 흐르고 있는 것을 알 수 있다. 이때, 인버터 입 력전류를 FFT 분석해 보면 0~200Hz 범위에서 직류전류 성분만 존재하는 것을 알 수 있다. 다시 말해, 정상동작 시 인버터 입력전류는 직류전류 성분만 존재한다.



Fig. 6. Stator currents and inverter input current (normal condition)

Fig. 7은 고정자 권선 부분단락 고장 시 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 고정자전류 FFT 분석만으로는 정상분 고정자전류와 역상분 고정자전류를 분석할 수 없으므로 고장진단이 불가능하다. 하지만, 0~200Hz 범위에서 인 버터 입력전류를 FFT 분석해 보면 직류성분뿐만 아니라 2f^s의 전류성분이 검출됨을 알 수 있다. 이것은 인버터 입력전류에 나타나는 고정자 권선 부분단락 고장 시 역 상분 성분이다. 다시 말해, 고정자 권선 부분단락 고장 시 인버터 입력전류에는 고장을 판별 할 수 있는 2f^s 주 파수를 갖는 전류성분이 존재한다.



Fig. 7. Stator currents and inverter input current (stator fault condition)

Fig. 8은 회전자 바 균열 고장 시 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 고정자전류는 정격 크기와 주파수에 맞게 흐 르고 있고 (1-2s)f^s 의 주파수를 갖는 회전자 바 균 열 고장 주파수 성분이 발생한 것을 알 수 있다. 여기서, 고장전류는 정격전류에 근접해 있으므로 고장진단에 어 려움이 있다. 0~200Hz 범위에서 인버터 입력전류를 FFT 분석해 보면 정상동작 시와 같이 직류성분이 나타 나는 것을 볼 수 있고, 2(1-s)f^s 에 회전자 바 균열 고장전류 성분이 검출됨을 알 수 있다. 이 성분은 고정자 전류에서와 달리 정격전류 주파수와 분리되어 나타난다. 다시 말해, 회전자 바 균열 고장 시 인버터 입력전류에는 고장을 판별 할 수 있는 $2(1-s)f^s$ 주파수를 갖는 전 류성분이 존재한다.



Fig. 8. Stator currents and inverter input current (rotor fault condition)

5. 결론

본 논문은 기존의 유도전동기 고장진단에 사용되는 MCSA 기법을 이용한 고정자전류 FFT 분석 진단 방법 을 사용하지 않고, 인버터 입력전류를 FFT 분석을 통한 고장진단 방법을 제안하였다. 이 방법은 기존 고장진단 방법이 3개의 전류센서를 이용한 것과 달리 한 개의 전 류센서를 이용하여 고정자 권선 부분 단락과 회전자 바 균열에 대한 고장진단이 가능하다. 시뮬레이션을 통하여 본 논문이 제안한 유도전동기 고장진단 방법의 우수성과 유효성을 증명하였다.

References

- A. Bellini, F. Filippetti, C. Tassoni, and G.-A. Capolino, "Advances in diagnostic techniques for induction machines," *IEEE Trans. Ind. Electron*, vol. 55, no. 12, pp. 4109 - 4126, Dec. 2008. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2008.2007527
- [2] C. Concari, G. Franceschini, and C. Tassoni, "Differential diagnosis based on multivariable monitoring assess induction machines rotor conditions," *IEEE Trans. Ind. Electron*, vol. 55, no. 12, pp. 4156 – 4166, Dec. 2008. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2008.2003212
- [3] F. Immovilli, C. Bianchini, M. Cocconcelli, A. Bellini, and R. Rubini, "Bearing fault model for induction motor with externally induced vibration," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 8, pp. 3408 - 3418, Aug. 2013. DOI: <u>http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2012.2213566</u>
- [4] Y. Da, X. Shi, and M. Krishnamurthy, "A new approach to fault diagnostics for permanent magnet synchronous machines using electromagnetic signature analysis," *IEEE Trans. Power Electron*, vol. 28, no. 8, pp. 4104 -4112, 2013.
 - DOI: http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2012.2227808
- [5] P. M. De La Barrera, G. R. Bossio, and J. A. Solsona, "High-resistance connection detection in induction motor drives using signal injection," *IEEE Trans. Ind. Electron*, vol. 61, no. 7, pp. 3563 - 3573, Jul. 2014. DOI: <u>http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2013.2278957</u>
- [6] I. Georgakopoulos, E. Mitronikas, and A. Safacas, "Detection of induction motor faults in inverter drives using inverter input current analysis," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 58, no. 9, pp. 4365 - 4373, Sep. 2011. DOI: <u>http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2010.2093476</u>
- [7] J. Faiz, V. Ghorbanian, and B. M. Ebrahimi, "EMD-based analysis of industrial induction motors with broken rotor bars for identification of operating point at different supply modes," IEEE Trans. Ind. Informat, vol. 10, no. 2, pp. 957 - 966, May 2014. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/TII.2013.2289941
- [8] B. Xu, L. Sun, L. Xu, and G. Xu, "Improvement of the Hilbert method via ESPRIT for detecting rotor fault in induction motors at low slip," *IEEE Trans. Energy Convers*, vol. 28, no. 1, pp. 225 - 233, Mar. 2013. DOI: <u>http://dx.doi.org/10.1109/TEC.2012.2236557</u>

한 정 호(Jungho Han)

[준회원]



- •2008년 8월 : 서울과학기술대학교 전기공학과 (공학사)
- •2011년 2월 : 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도전기신호공학 과 (공학석사)
- •2011년 3월 ~ 현재 : 서울과학기 술대학교 철도전문대학원 철도전기 신호공학과 박사과정

<관심분야> 전력변환장치, 전력품질

송 중 호(Joong-Ho Song)

[정회원]



- •1982년 2월 : 서울대학교 전기공학 과 (공학석사)
- •1993년 8월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
- •1985년 3월 ~ 2002년 8월 : 한국 과학기술연구원 책임연구원
- •2002년 9월 ~ 현재 : 서울과학기 술대학교 전기정보공학과 교수

<관심분야> 전력전자, 전동기제어, 전력품질해석

최규형(Kyu-Hyoung Choi)

[정회원]



- •1989년 3월 : 무로란공업대학교 전 기공학과 (공학석사)
- 공학과 (공학박사)
- •1996년 8월 ~ 2005년 2월 : 한국 철도기술연구원 수석연구원
- 술대학교 철도전기신호공학과 교수

<관심분야> 철도정보통신, 철도신호제어

- •1992년 3월 : 홋카이도대학교 전기
- •2005년 3월 ~ 현재 : 서울과학기