

주파수 해석 방법에 의한 유도전동기의 고정자 권선 고장 진단

한민관, 우혁재, 송명현, 박규남
 순천 대학교 전기제어공학과*

Frequency Analysis Based Induction Motor Stator Fault Detection

Min-Kwan Han, Hyeok-jae Woo, Myung-hyun Song, Kyu-nam Park.
 ECE, Suncheon National University

Abstract - 본 논문에서는 3상 유도 전동기 고정자 전류 신호로부터 고정자 권선 고장에 대한 특성주파수들을 효과적으로 검출하기 위한 고정자 전류 신호 해석 기법을 제시하였으며, 인위적인 턴 대 턴 고장 전동기의 부하실험을 통해 제안된 기법의 유효성을 확인하였다.

f_1 = 공급 주파수
 $n=1,2,3,\dots$
 $k=1,3,5,\dots$
 p = 극쌍
 s = 슬립

1. 서 론

유도 전동기는 기계적 구조가 간단하고, 폭 넓은 응용 범위, 제어의 간단함으로 가장 널리 쓰이는 전기 기기이다. 이러한 전동기의 고장은 전동기의 정지 시간 연장, 보수 비용의 상승, 그리고 심각한 안전 문제를 발생시킬 수 있어 고장 진단의 필요성이 강조되고 있다. 최근 들어 전동기 고장에 대한 연구는 전동기 전류 신호 해석(Motor Current Signature Analysis : MCSA) 방법이 각광을 받고 있다. 전동기 고장은 고정자 고장(38%), 회전자 고장(10%), 베어링 고장(40%)이 주를 이루고 있는데, 전동기의 전기적인 고장의 대부분은 고정자 고장이 차지하고 있다. 고정자 고장의 주된 원인으로는 절연 파괴이며, 고장의 형태는 턴 대 턴, 코일 대 코일, 회로 개방, 상 대 상, 코일 대 접지 등으로 나타난다. 그 중에서 턴 대 턴 고장은 검출이 가장 어렵고, 단락된 턴에서의 발생한 열은 상 대 상, 코일 대 접지 등은 심각한 고장으로 빠른 속도로 확산 될 수 있으므로, 초기 고장검출이 매우 중요하다.

고정자 고장 검출에 대한 연구로는 Thomson 등이 회전자 슬롯 통과 주파수를 조사함으로써 턴 고장 검출을 시도하였으며(4), Filippetti 등은 인공지능을 이용한 고장 진단 방법을 제시하였다(5). Penman 등은 고정자 권선 고장 검출을 위해 턴 단락 에서 발생한 축 누설 자속을 이용하였다(3). Kohler 등은 역상 임피던스의 변화를 고장 검출에 이용하였으며(6). Cardoso, Cruz는 고정자 권선 고장 및 위치 검출에 Park's Vector법을 제시하였다(8).

본 연구에서는 3상 농형 유도 전동기에서 고정자 권선의 2, 6, 10, 30턴 고장 턴 수 변화에 따른 고장 특성 주파수를 무부하와 정격부하 실험을 통하여 확인하고, 전류 스펙트럼을 이용한 고정자 권선 고장 진단 방법의 유용성을 보였다.

2. 고정자 고장 전류 신호 해석

고정자 권선 고장으로 인한 고정자 전류의 변화는 공극 편심을 발생시켜 공극 자속 밀도의 변화를 가져온다. 이것이 고정자 권선 고장 특성 주파수들을 발생시키게 된다[2, 3]. 이 주파수 성분들은 다음과 같은 식으로 계산되어 질 수 있다.

$$f_{st} = f_1 \left\{ \frac{n}{p} (1-s) \pm k \right\} \quad (1)$$

f_{st} = 단락 턴에 의한 주파수 성분

MCSA를 통한 턴 단락 고장 진단은 식(1)에 의해서 주어지는 주파수 성분의 검출에 기초한다.

3 실험 결과 및 검토

3.1 실험 장치 구성

그림1은 고정자 전류 모니터링 실험 장치 구성도를 보여주고 있다. 60Hz, 1Hp, 220/380V, 3.8/2.2A, 36개의 고정자 슬롯, 44개 회전자 슬롯, 4극, Y결선, 3상 농형 유도 전동기이며, 부하로써 DC 발전기를 사용하여 정격부하를 연결하였다. 이 전동기는 1상중 1코일에 2, 4, 10, 20, 40, 70턴에 외부 탭을 내어 인위적인 턴 단락 고장을 내어 실험하였다. 고정자 전류는 Current Probe와 Current Amplifier를 통해 FFT 분석기에 입력되며, FFT 분석기로 턴 단락 고장 특성 주파수를 확인하였다. 특성 주파수 검출을 위해 정상, 2, 6, 10, 30턴 단락 고장 실험을 무부하와 정격부하에서 각각 실시하였다.

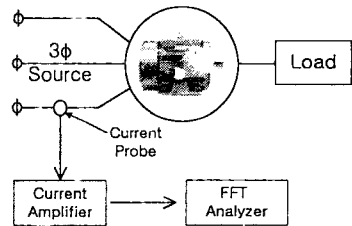


그림1 실험 장치 구성도

3.2 무부하 실험 결과

무부하시 회전속도는 1797rpm이고, 식(1)에 의해 다음과 같은 주파수 성분들이 발생한다.

- $k=1, n=1$ $f_{st} = 30\text{Hz}, 90\text{Hz}$
- $k=1, n=2$ $f_{st} = 0\text{Hz}, 120\text{Hz}$
- $k=1, n=3$ $f_{st} = 30\text{Hz}, 150\text{Hz}$
- $k=1, n=4$ $f_{st} = 60\text{Hz}, 180\text{Hz}$
- $k=1, n=5$ $f_{st} = 90\text{Hz}, 210\text{Hz}$

유도 전동기는 고유의 정적, 동적 공극 편심을 가지고 있으며, 그 공극 편심에 의한 주파수 성분이 30, 90Hz 이다($\pm f$, 회전 주파수). 축 부 정렬 또한 그러한 주파수 성분의 크기에 영향을 준다는 것이 입증되어 있다. 공급 전압에서의 불균형 성분은 120Hz 고조파의 원인이 될 수 있고, 또한 자기회로의 B-H 특성으로 인해 180Hz 고조파가 발생할 수 있다.

150, 210Hz는 무부하 공급주파수와 겹치지 않고, 단지, 턴 단락 고장에 의해만 발생하는 주파수 성분이다.

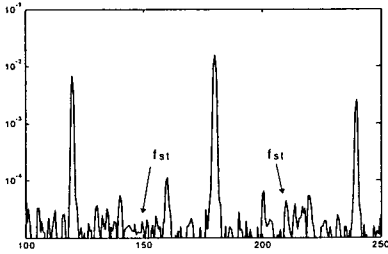


그림2 무부하 정상

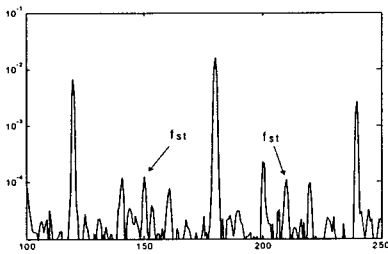


그림3 무부하 2턴 단락

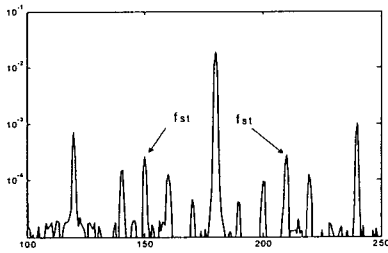


그림4 무부하 6턴 단락

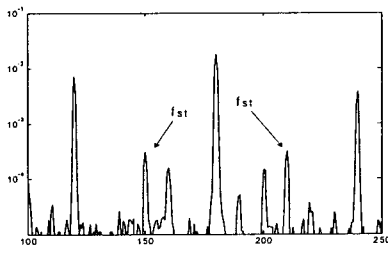


그림5 무부하 10턴 단락

그림3에서 그림6은 무부하에서 2, 6, 10, 30턴 단락 고장의 전류 스펙트럼을 보여주고 있다. 2턴 단락 고장인 그림3에서 150과 210Hz 주파수 성분이 정상인 그림2의 그것에 비해 큰 폭의 변화를 보인 것을 볼 수 있다. 그리고 2턴에서 30턴 고장까지 턴 수가 증가함에

따라 크기가 조금씩 증가하고 있는 것을 보여주고 있다. 그러나 그 턴 수 증가에 따른 변화량은 정상에서 2턴 고장이 일어났을 때의 변화량에 비하면 무시할 수 있을 만큼의 작은 변화량이었다.

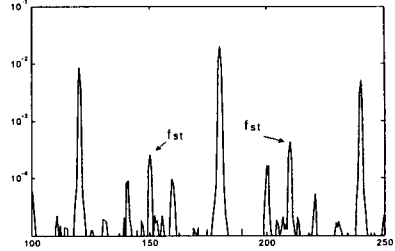


그림6 무부하 30턴 단락

3.3 정격 부하 실험 결과

정격 부하일 때 전동기 회전 속도가 1660 r.p.m(s : 0.077)이 되어 식(1)에 의해 무부하에서 150, 210Hz인 특성 주파수가 143, 198.5Hz로 변환다.

그림7에서 그림11은 정격 부하에서 정상, 2, 6, 10, 그리고 30턴 고장 일 때의 전류 스펙트럼을 보여주고 있다. 정상(그림7)과 2턴 단락 고장(그림8)에서 143, 198.5Hz

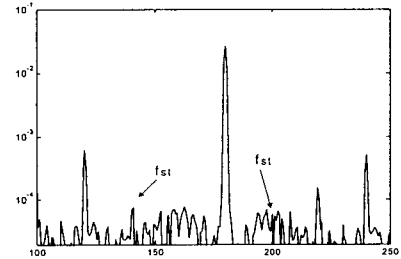


Fig. 7 정격부하 정상

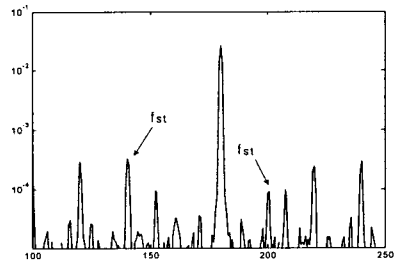


그림8 정격부하 2턴 단락

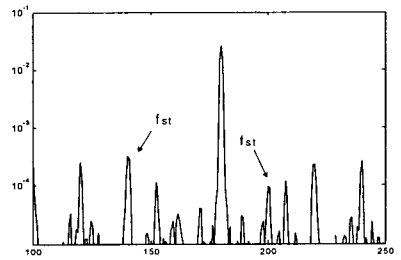


그림9 정격부하 6턴 단락

주파수 성분에서 큰 변화를 볼 수 있으며, 2턴에서 30턴까지의 턴 수 변화에 따른 주파수 성분의 크기 변화는 거의 없음을 볼 수 있다.

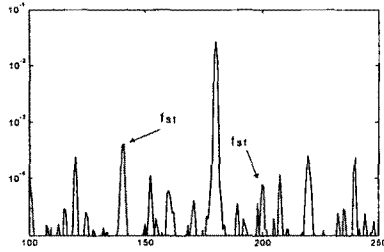


그림10 정격부하 10턴 단락

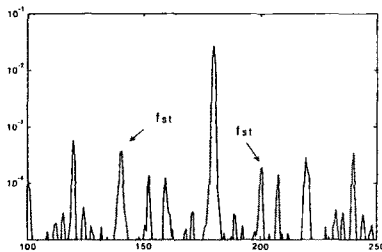


그림11 정격부하 30턴 단락

3.4 같은 턴 고장에서 무부하와 정격 부하 실험 결과 고찰

무부하에서 정격 부하로 변할 때 특성 주파수 성분은 슬립에 의해 150, 210Hz에서 143, 198.5Hz로 변하는 것을 볼 수 있었다. 이것은 부하에 따라 슬립의 영향을 받아 특성주파수가 변하고 있음을 알 수 있다. 턴 단락 턴 수가 2, 6, 10, 30턴으로 증가함에 따라 나타나는 무부하와 정격부하 일 때 주파수 성분의 크기의 차는 무시할 수 있을 정도로 작았다. 부하의 영향 보다 턴 단락의 영향이 지배적으로 나타났다.

4. 결 론

본 논문에서는 각 부하에 따른 단락 턴 수의 증가가 전류 스펙트럼에 어떠한 영향을 미치는가를 실험을 통해 확인하였고, 고정자 전류 스펙트럼을 분석함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 무부하 실험에서 2턴 같은 작은 턴 수에서도 고정자 권선 고장이 검출되었고, 고장 턴수가 6, 10, 30턴으로 증가하여도 크기의 변화는 처음 턴 단락 고장 발생되었을 때의 변화와 비교하면, 아주 작은 값의 변화가 있었다.

2) 정격부하 실험에서 고정자 권선 고장은 슬립의 영향을 받았으며, 무부하와 마찬가지로 작은 고장도 검출할 수 있었으며, 30턴까지의 턴 수 증가에는 큰 변화를 가져오지 않았다.

3) 고정자 권선 고장은 턴 단락의 영향이 부하의 증가나 고장 턴 수의 증가를 포함한 어떠한 원인들 보다 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

[참 고 문 헌]

[1] W.T. Thomson, "On-Line MCSA To Diagnose Shorted Turns In Low Voltage Stator Windings Of 3-Phase Induction Motor Prior To Failure", presented at the IEEE PES&IAS IEMDC, 891~898, 2001

[2] S Fruchenecht, E Pittius and HSeinsch, "A Diagnostic System for Three-Phase Asynchronous Machines", Proc IEE Conf, Vol 310, 163~171, 1989

[3] J Penman, H. G Seding, W T Fink, "Detection and Location of Inter-turn Short Circuits in the Stator Windings of Operating Motors", IEEE Transactions on Energy Conversin, V9, No 4, 1994

[4] THOMSON, W.T, "A review of on-line condition monitoring technique for three-phasesquirrel cage induction motors past, present and future", Proceedings of the 1999 IEEE International symposium on Diagnostics for electrical machines, power electronics and drives, SDEMPED, 3~18, 1999

[5] FILIPPETTI, C, FRANCESCHINI, G, TASSONI, F, and VAS, P, "Integrated condition monitoring and diagnosis of electrical machines using minimum configuration artificial intelligence" Proceeding of EPE, Vol 2, 983~988, 1997

[6] KOHLER, J.L, SOTTILE, J, and TRUTT, F.C, "Alternative for assessing the electrical integrity of induction motors", IEEE Trans. Ind. Appl, 1109~1117, 1992

[7] KLIMAN, G.B, PREMERLANI, W.J, KOEGL, R.A, "A new approach to on-line turn fault detection in AC motor", Proceeding of IAS Annual Meeting, 687~693, 1996

[8] A.J.M. Cardoso, S.M.A. Cruz, and D.S.B. Fonseca, "Inter-Turn Stator Winding Fault Diagnosis in Three-Phase Induction Motor, by Park's Vector Approach", IEEE Trans. Energy Conversion, vol.14, 595~598, 1999

[9] G. Joksimovic, J Penman, "The detection of inter turn short circuits in the stator windings of operating motors", IEEE, 1998