

유도 전동기 구동 시스템의 고장진단

김 호근*, 설 승기
서울대학교 전기공학과

Fault Diagnosis for Induction Motor Drive System

Ho-Geun Kim*, Seung-Ki Sul
Department of Electrical Engineering
Seoul National University

Abstract - In this paper, fault analysis using simulation method and fault diagnosis scheme are presented for induction motor drive system. Major faults such as inverter 'a' phase open fault, inverter 'a'-'b' phase short circuit fault and inverter 'a' phase ground fault are analyzed and simulated. On-line and off-line fault diagnosis systems are proposed.

1. 서론

교류 구동 시스템(AC Drive System)은 용량과 성능면에서 상당한 성장을 이루어 왔고 따라서 시스템은 이전에 비해 매우 복잡해졌다. 시스템에 고장이 발생했을 때 최대한 빠르게 복구하는 것은 신뢰성있는 시스템을 갖추기 위해 필수 조건이다. 현재 많이 연구되고 있는 것이 사람의 고장에 대한 경험적 지식을 프로그래밍하는 전문가 시스템(Expert System)이나[1] 사람의 고장에 대한 경험적 지식은 단순하게 수식화할 수가 없고 오랜 시간동안 시행착오를 거쳐 얻은 것이기 때문에 이의 구현은 쉽지가 않다. 더구나 유도 전동기 구동 시스템에 관하여는 거의 연구가 없는 실정이다. 고장 발생시의 상황을 시뮬레이션하므로써 평소 시스템동작시 중요 전압, 전류등의 변수들을 분석하여 고장 발생시 시스템의 고장의 원인을 추측할 수가 있고 고장이 발생하는 것을 사전에 방지하는 것도 가능하다. 또한 적절한 보호방법을 강구하여 고장에 의해 파급되는 영향을 최소화 할 수 있다[2-4].

본 논문에서는 유도 전동기 구동 시스템의 중요 고장에 대해 고장 해석(Fault analysis)의 방법을 제시하고 이를 바탕으로 온라인(On-line) 및 오프라인(Off-line)으로 고장 진단(Fault Diagnosis)을 하는 시스템을 제시한다.

2. 유도 전동기 구동 시스템

그림 1. 은 22kW 대용량 유도 전동기 구동 시스템의 전체 구성도이다. 시스템에서는 내부적으로 사용될 정보를 위해 시간전압, 전압 전류, 직류링크 전압, 인버터 전류, 속도 등을 읽어 들인다. 컨버터는 다이오드 정류기가 아닌 인버터와 똑같은 회로로 구성되어 양방향으로 전력 변환이 가능한 AC-DC-AC 시스템을 기본 구성으로 하고 있다[5]. 전력용 반도체로서는 IGBT로서 IPM(Intelligent Power Module)을 사용한다. IPM은 내부적으로 보호기능이 있어 OC(Over Current), SC(Short Circuit), OT(Over Temperature), UV(Under Voltage)등의 고장 발생시에 자체적으로 회로를 차단하고 그에 해당하는 고장 신호를 발생한다.

3. 고장 해석(Fault analysis)

3.1 정상 운전시 전압 방정식

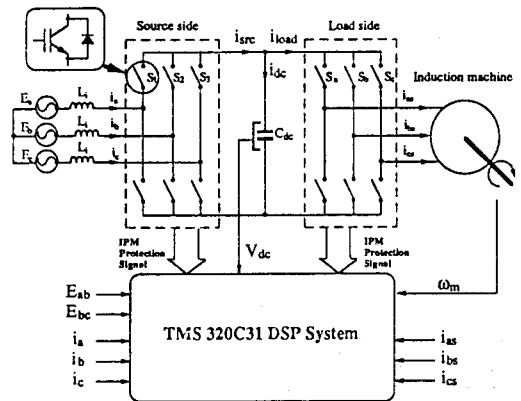


그림 1. 유도 전동기 구동 시스템의 전체 구성도

고장시의 전압식, 전류식을 표시하기전에 먼저 정상운전시의 수식을 구해본다. 인버터와 전동기 사이의 연결이 정상일 경우에 직류 링크의 전압의 중간(n)을 가상 중성점으로 잡으면 인버터 출력 전압식과 전동기 3상 전압식은 각각 식 (1), (2)와 같다. S_a, S_b, S_c 인버터의 스위칭 함수로서 1 이면 해당상의 상위 스위치가, 0 이면 하위 스위치가 켜진 상태다.

$$V_{an} = \frac{V_{dc}}{2} (2S_a - 1)$$

$$V_{bn} = \frac{V_{dc}}{2} (2S_b - 1)$$

$$V_{cn} = \frac{V_{dc}}{2} (2S_c - 1)$$
(1)

$$V_{as} = \frac{1}{3} (2V_{an} - V_{bn} - V_{cn})$$

$$V_{bs} = \frac{1}{3} (2V_{bn} - V_{an} - V_{cn})$$

$$V_{cs} = \frac{1}{3} (2V_{cn} - V_{an} - V_{bn})$$
(2)

그러나 고장이 발생하면 전동기의 입력단에는 식 (2)와는 다른 전압식이 주어진다. 정상 운전시에는 전동기 전류와 축정 전류가 같았지만 고장 발생시에는 축정 전류와 전동기 전류사이에 새로운 전류식이 구성된다.

3.2 인버터 출력단 a 상 단선 사고

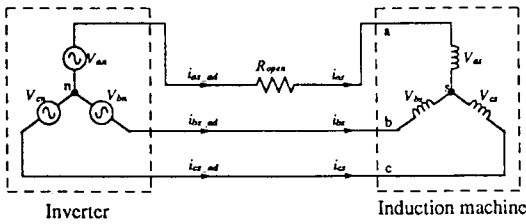


그림 2. 단선시 시스템 구성도

3상이 대칭(Symmetry)이므로 고장은 a 상에 대해서만 고려한다. 그림 2. 는 단선시의 시스템 구성도이다. 단선 사고시 전동기 전류는 급격히 영이 될 수가 없기 때문에 단선 사고는 단선이 되는 과도기와 완전히 단선된 2가지로 나눌 수 있다.

i) 단선 과도기

단선이 되는 과정을 시뮬레이션하기 위해 단선저항(R_{open})을 도입하여 영에서부터 일정한 비율로 증가시키면 전압식은 식 (3)과 같이 주어진다.

$$e_g = \frac{1}{3} (V_{an} + V_{bn} + V_{cn} - R_{open} i_{as})$$

$$V_{as} = V_{an} - e_g - R_{open} i_{as} \quad (3)$$

$$V_{bs} = V_{bn} - e_g$$

$$V_{cs} = V_{cn} - e_g$$

ii) 단선 모드

a 상 전류가 거의 영으로 수렴하면 완전 단선 모드로 전환한다. 단선 저항(R_{open})을 제거한 상태에서 전압식은 식(4)과 같다.

$$V_{as} = \frac{d\lambda_{as}}{dt}$$

$$V_{bs} = \frac{1}{2} (V_{bn} - V_{cn} - V_{as}) \quad (4)$$

$$V_{cs} = \frac{1}{2} (V_{cn} - V_{bn} - V_{as})$$

3.3 인버터 출력단 단락(a-b) 사고

단락 모드와 단락에 의한 과전류에 의해 보호회로가 동작하여 게이팅이 차단된 게이팅 차단 모드로 나올 수 있다.

i) 단락(a-b) 모드

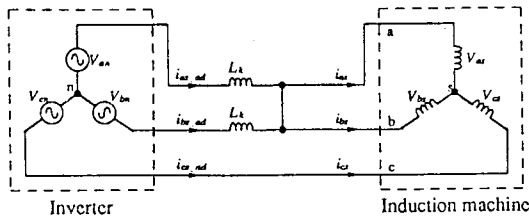


그림 3.(a) 단락시 시스템 구성도

그림 3.(a)는 단락시 시스템 구성도이다. 전압 방정식을 구성하기 위해 선(Line)의 부유 인덕턴스(Stray inductance) 즉 L_k 를 도입하면 전압식, 전류식은 각각 식 (5), (6)과 같이 주어진다.

$$V_{as} = V_{bs} = \frac{1}{3} (V_{bn} - V_{cn} - L_k \frac{d(i_{bs-od} - i_{cs-od})}{dt}) \quad (5)$$

$$V_{cs} = \frac{2}{3} (V_{cn} - V_{bn} + L_k \frac{d(i_{bs-od} - i_{cs-od})}{dt})$$

$$i_{as-od} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{L_k} \int (V_{cn} - V_{bn}) dt + i_{as} + i_{bs} \right) \quad (6)$$

$$i_{bs-od} = i_{as} + i_{bs} - i_{as-od}$$

실제로 단락 모드는 순간적으로 끝난다. 왜냐하면 L_k 는 수십 uH 정도의 작은 부유 인덕턴스(Stray Inductance)이므로 상 전류가 급격히 증가하는 요인이 된다. 단락이 발생하면 즉시 과전류 보호회로에 의해 게이팅이 차단되어 다음 모드로 넘어간다.

ii) 게이팅 차단 모드

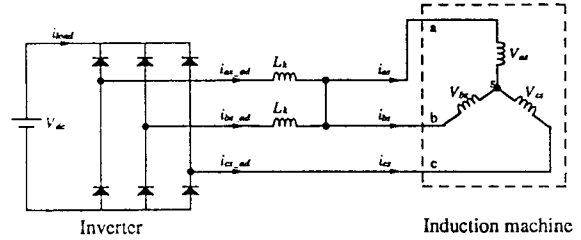


그림 3.(b) 게이팅 차단시 시스템 구성도

의해 보호회로가 동작하여 게이팅이 차단되면 인버터는 3상 다이오드 정류기로 볼 수 있고 전동기는 에너지를 전원측에 반환한다. 다이오드의 도통($I_{obs-dir}$)은 각상의 전류의 방향에 의해 결정된다.

$$I_{obs-dir} = \begin{cases} 0 & I_{as} > 0 \\ 1 & I_{as} < 0 \end{cases} \quad (7)$$

이때 전압식, 전류식은 각각 식 (8), (9)과 같다.

$$V_{as} = V_{bs} = \frac{V_{dc}}{3} (1 - 2I_{cs-dir}) \quad (8)$$

$$V_{cs} = -2V_{as}$$

$$I_{load} = I_{as-dir} I_{as-od} + I_{bs-dir} I_{bs-od} + I_{cs-dir} I_{cs-od} \quad (9)$$

$$i_{ad-od} = i_{bs-od} = -\frac{i_{cs}}{2}$$

3.4 인버터 출력단 a 상 접지 사고

접지 사고시에는 직류 링크의 전압과는 별개로 3상 입력 전원에서부터 전류가 유입한다. 접지와 접지 간에 흐르는 전류에 의해 3상의 전류의 합은 영이 되지 않아 입력 3상 변압기의 자속 포화(Saturation)을 유발시킬 수 있다. 그러므로 접지 사고유무의 판단은 중요하다 하겠다. 인버터 운전시 하드웨어 또는 프로그램으로 3상 전류의 합이 영이 되지 않는 경우에 접지사고로 판단한다.

4. 시뮬레이션

표 1에 시뮬레이션에서 사용한 유도기 정격 및 상수를 표 시하였다.

22 kW, 220V, 4Poles, 60Hz	
R_s : 0.041 Ω	R_r : 0.028 Ω
L_s : 13.65 mH	L_r : 13.95 mH
L_m : 13.28 mH	J_m : 0.122 kg/m ²

표 1. 유도기 정격 및 상수

시뮬레이션은 전부하, 1800rpm으로 정속도 운전중에 시행하였다. 그림 4는 a상 단선, 전부하시의 중요 변수의

파형이다. a 상 전류가 급격히 영이 됨을 볼 수 있고 토크와 속도가 동작 주파수의 2배로 크게 흔들림을 볼 수 있다. b, c 상 전류는 천천히 증가하여 파전류 레벨을 초과하지 않을 수가 있다.

그림 5는 단락, 전부하시의 중요 파형이다. 모터 내부에 상당히 큰전류가 흐르고 있음을 볼 수 있다. 리플(ripple) 토크가 크므로 전동기 축에 영향을 줄 수 있다.

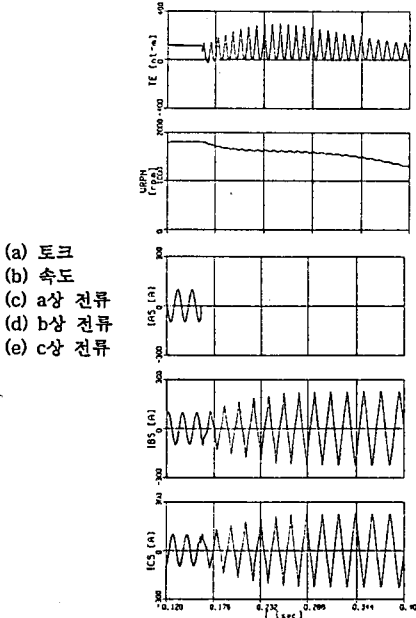


그림 4. a 상 단선 사고 파형(전부하)

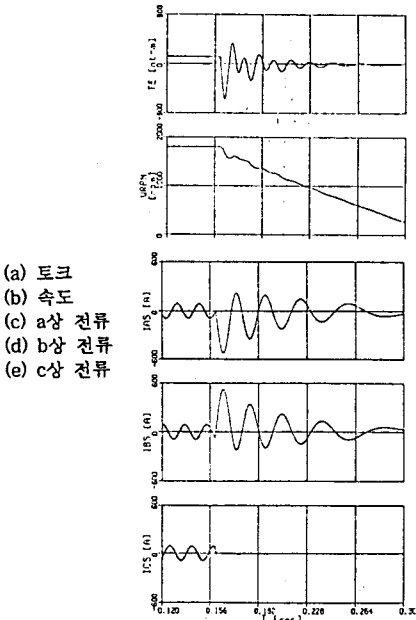


그림 5. 단락(a-b) 사고 파형(전부하)

5. 고장 진단(Fault diagnosis) 시스템

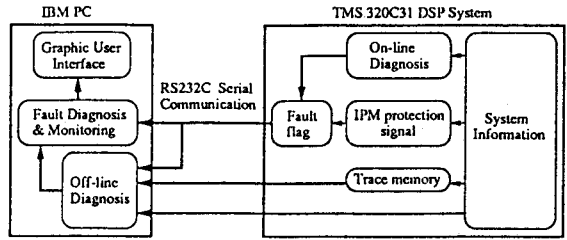


그림 6. 고장 진단 시스템

그림 6에 고장 진단을 위한 시스템 구성도이다. 기본적인 구성은 DSP측의 온라인(On-line) 프로그램과 PC측의 오프라인(Off-line) 프로그램으로 이루어진다. PC와 DSP간의 RS232C 직렬 통신(Serial communication)을 이용하여 정보를 교환한다. 온라인 프로그램은 운전중에 계속 고장을 감시하고 고장 발생시 결과를 고장 플래그(Fault flag)에 저장하여 이를 PC로 전달한다. 오프라인 프로그램은 고장 발생후 고장 플래그, 시스템의 운전시 중요변수가 저장된 트레이스(Trace) 자료 및 그밖의 시스템 정보를 전송 받아 이를 분석하는 방법이다. 고장 진단 프로그램은 두 프로그램의 결과를 가지고 최종 고장 판단을 수행한다. PC측 프로그램은 이식성, 확장성이 뛰어난 C++ 코드로 이루어졌으며 Windows의 GUI(Graphic User Interface)환경이므로 사용자에게 편리한 사용자 환경을 제공한다. DSP측 프로그램은 고속의 TMS320C31의 어셈블리어 코드로 구성된다. 위에서 알아본 고장의 분석 방법을 정리하면 아래와 같다.

고장 종류	분석 방법
a 상 단선 사고 검사	온라인
a 상 단락 사고 검사	오프라인
a 상 지락 사고 검사	온라인 (고저항접지시) 오프라인(저저항접지시)

6. 결론

지금까지 유도 전동기 구동시스템에서 문제가 되었던 중요 고장에 대해 고장을 해석하였고 특성을 알아보기 위해 고장 상황의 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 PC와 고성능 DSP를 사용하여 온라인, 오프라인으로 고장진단을 하는 시스템을 제안하였다. 시차 단계이므로 앞으로 다른 고장에 대한 연구가 계속 되어야 하겠고 수식으로 쉽게 정리가 안되는 고장에 대한 연구도 진행되어야 하겠다.

아직 시뮬레이션단계이므로 실험을 통해 이론의 타당성을 검증하는 것이 필요하다.

7. 참고 문헌

- [1] K. Debebe, V. Rajagopalan, "Diagnosis and monitoring for AC drives," IEEE IAS Annual meeting, pp. 370-377, 1992
- [2] A. Consoli and T. A. Lipo, "Orthogonal axis models for asymmetrical connected induction machines," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, NO. 12, pp. 4518-4526, December 1982
- [3] Olorunfemi Ojo and Ishwar Bhat, "Analysis of faulted induction motor fed with PWM inverter," IEEE IAS pp. 647-655, 1992
- [4] Y. Baudon, L.Gerbaud and J.Saadi, "Analysis of defects on a controlled converter-machine system advantage of the simulation," IEEE IAS pp. 477-482, 1990
- [5] 최중우, 설승기, "전력 커패시터 없는 양방향성 PWM 공진형 컨버터", 추계학술대회 논문집, 1992