

## 인버터 구동 유도전동기의 계통사고 해석

권영목 김재철 송승엽 신중은  
송실대학교

### System Fault Analysis of Inverter Fed Induction Motor drives

Young-Mok Kwon, Jae-Chul Kim, Seung-Yeop Song, Joong-Eun Shin  
Soongsil University

**Abstract** - Recently, operating equipment with the high quality is necessary as technology is developing rapidly and equipment becomes more accurate. Therefore, the importance of diagnosis has been rising in modern industries.

This paper presents that the induction motor is driven by inverter. We were using EMTF (Electromagnetic Transient Program) to study different characteristics of induction motor caused by faults; single phasing and the short circuit fault. After having the fault occurred in feeder cable, motor current, flux and torque waveform are analyzed

스위칭 회로는 다이오드 브리지 정류기, DC-Link, 전압원 인버터로 구성되었다. 제어시스템으로 TACS (Transient Analysis of Control System)를 사용하였으며, 회전기는 UM(Universal Machine) Model을 이용하였다.

#### 2.1 가변속 구동장치의 모델링

본 논문에서는 다이오드 정류기로 컨버터부를 사용하였으며 PWM 3-level 인버터를 이용하여 유도전동기를 제어하는 회로를 구성하였다.

PWM 3-level 인버터는 구형파 인버터와 달리 일정한 입력전원을 가지고 크기와 주파수에서 3상 출력 전압을 만들어 유도전동기를 제어할 수 있다.

### 1. 서 론

전력전자 소자의 발전으로 인한 가격대비 효율 그리고 기계적으로 견고한 장점으로 과거 직류 전동기의 역할을 유도전동기가 대신하게 되었다.

현대의 유도전동기 구동장치는 DC-Link가 포함된 인버터 컨버터의 결합, 되먹임 신호 변환기와 소프트웨어 주 처리장치를 포함하고 있다. 이 전기기기의 구성요소는 특히 마모, 노화, 파파, 충격 또는 비전기적 원인으로 고장나기 쉽다. 따라서 구성품의 빠른 사고 검출과 진단은 높은 품질을 요구하는 기기와 구동장치의 사고를 예방하기 위해서 중요하다.[1]

그러므로 사고와 진단의 빠른 검출 시간과 정확성을 높이기 위해서 사고 발생시 일어나는 상황을 예측 할 수 있어야 한다.

유도전동기가 오래전부터 사용되어 온 기기이기 때문에 이전에 많은 연구들이 진행되었지만 전력전자 소자에 발전으로 유도전동기의 구동장치 환경이 계속적으로 변화 발전되어 현재에도 변화된 환경을 적용한 연구들이 진행되고 있다.

일반적으로 정현파를 공급받는 유도전동기의 단락사고나 결상사고는 과전류에 의해서 전동기의 권선이 소손된다. 하지만 직입구동에서 발생하는 결상사고 및 단락사고와 인버터가 연결된 상황에서 발생하는 결상사고 및 단락사고의 전류, d-q축의 회전자계 및 토크 특성은 같지 않을 것이다.

이에 본 논문에서는 직입구동과 DC-Link가 포함된 인버터 컨버터를 연결한 유도전동기의 정상 구동시 나타나는 유도전동기 권선의 전류 및 토크 특성과 단락사고와 결상사고 발생시 나타나는 유도전동기 권선의 전류파형과 회전자계 및 토크 특성 곡선을 비교 분석하였다.

### 2. 모델링

본 논문에서는 유도전동기의 사고사태를 모의하기 위하여 전자계 해석프로그램(EMTP : Electromagnetic Transient Program)을 사용하였다. 그림 1은 EMTF를 이용한 가변속 구동장치의 구성도이다.

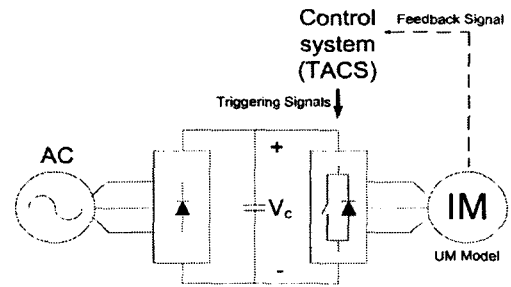


그림 1 가변속 구동장치 회로 EMTF 구성도

#### 2.2. 고압 유도전동기 모델링

EMTP에 있는 유도기, 동기기, 직류기등 12종류의 회전을 모델링 할 수 있는 UM(Universal Machine) Model을 이용하여 유도전동기를 모델링 하였다.

이 UM Model은 전기적인 회로는 d-q-0축으로 표현하고 기계적인 요소는 전기회로로 유사화 하여 표현한다.

표 1은 전기계와 기계계사이의 상호관계를 나타낸다.

표 1. 전기계와 기계계 사이의 상호관계

| Mechanical            | Electrical                      |
|-----------------------|---------------------------------|
| T (Torque on Mass)    | I (Current into Node)           |
| $w_m$ (Angle Speed)   | V (Node Voltage)                |
| $\theta_m$ (Angle)    | Q (Capacitor Charge)            |
| J (Moment of inertia) | C (Capacitance to ground)       |
| K (Spring constant)   | $Y_L$ (Reciprocal of Induction) |
| D (Viscous Damping)   | $Y_R$ (Conductance)             |

전기계와 기계계를 결합한 시스템인 그림 1에서 운동 방정식은 식(1)과 같다.

$$T_m = J \frac{dw_m}{dt} + Dw_m + T_e \quad (1)$$

식 (1)을 전기적 방정식으로 바꾸면 식 (2)와 같이 된다.

$$I_m = C \frac{dV_m}{dt} + \frac{V_m}{R} + I_e \quad (2)$$

이렇게 변환된 데이터를 입력하여야 하며 부하 토크를 전 기적 변수로 변환할 경우 전동기는 부(-)로, 발전기는 정(+ )으로 된다.[2][3]

본 논문에서 사용될 유도전동기의 사양은 표 2에 제시하였다.

표 2. 1500[kW] 유도전동기 사양

|                  |   |             |
|------------------|---|-------------|
| Rating           | 1500[kW], 3300[V], 6P, 60[Hz]<br>Y-connected, squirrel cage |             |
| Parameter        | Stator resistance   | 0.341368[Ω] |
|                  | Rotor resistance  | 0.112588[Ω] |
|                  | Stator leakage Inductance                                   | 0.001543[H] |
|                  | Rotor leakage Inductance                                    | 0.001543[H] |
|                  | Mutual Inductance   | 0.029871[H] |
| Monet of Inertia | 78.5[kg · m <sup>2</sup> ]                                  |             |

### 3. 시뮬레이션

#### 3.1 정상상태 시뮬레이션

유도전동기의 단락 및 결상사고를 시뮬레이션 하기 위하여 비교분석의 기준이 되는 일반적인 직입방법과 인버터 구동으로 정상상태를 모의하였다.

유도전동기 구동을 위하여 직입구동은 UM model에 전원을 직접 연결하였다. 인버터 구동은 전원과 UM model 사이에 PWM 구동장치를 사용하여 구동하였다.

그림 2는 유도전동기 직입구동과 인버터 구동시 나타나는 토크 및 d-q축 자계와 고정자 권선 전류를 보여준다.

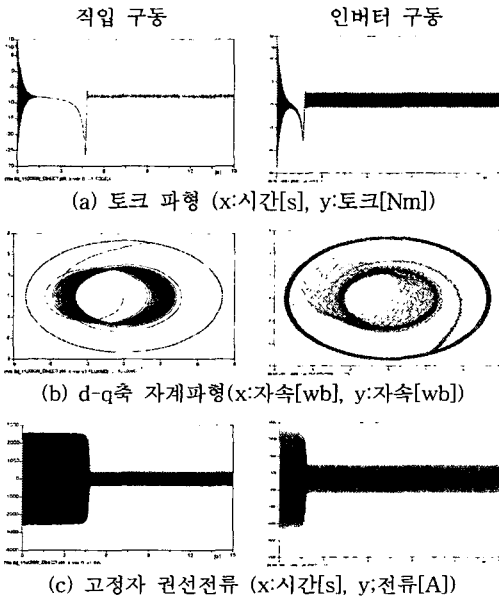


그림 2 각 구동방식에 따른 정상구동시 나타나는 토크, d-q축 자계 및 전류파형

인버터 구동장치를 지나면서 전류는 고조파가 발생하고 직류분이 증가하게 되어 전류의 값이 직입구동보다 상승됨을 볼 수 있다. 전류의 증가로 인하여 토크가 빠르게 안정된다.

#### 3.2. 사고사례 시뮬레이션

직입구동과 인버터 구동 두 가지 구동방식으로 유도 전동기의 결상 및 단락 사고발생을 시뮬레이션 하였다.

##### 3.2.1 결상사고

결상사고는 1상 결상과 2상 결상을 모의 하였다. 결상지점은 인버터 출력단과 유도전동기 입력단 사이선로에서 결상사고를 발생 시켰다.

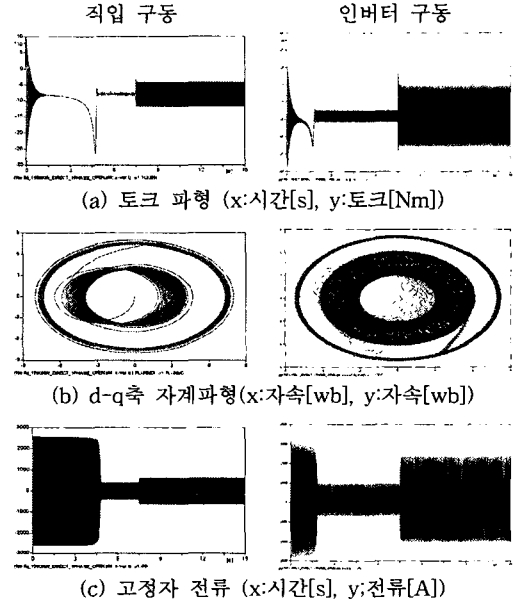


그림 3 각 구동방식에 따른 1상 결상사고시 나타나는 토크, d-q축 자계 및 전류파형

그림 3은 1상 결상사고 발생시 직입구동과 인버터 구동의 토크 및 d-q축 자계와 전류를 보여준다.

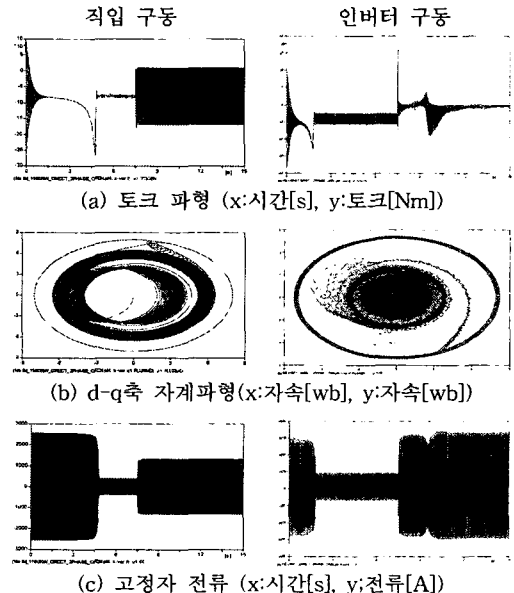


그림 4 각 구동방식에 따른 2상 결상사고시 나타나는 토크, d-q축 자계 및 전류파형

그림 4는 2상 결상사고 발생시 직입구동과 인버터 구동의 토크 및 d-q축 자계와 전류를 보여준다.

유도전동기는 결상된 상태에서 기동이 되지 않는다. 그러나 기동된 상태에서 결상이 발생되면, 유도전동기는 정격부하의 80% 이하의 부하와 단상전압이 정상일 경우 전동기는 회전상태를 계속 유지한다. 왜냐하면 유도전동기 회전자의 회전으로 직교자속이 계속 만들어지기 때문이다.[4]

그림 3과 그림 4에서 보면 유도전동기의 자계 파형이 심하게 흔들리는 것을 볼 수 있다. 토크파형 또한 상당히 변화가 심한 것을 볼 수 있다. 유도전동기가 결상이 발생하면 그림3, 그림4에서 볼 수 있듯이 자계의 흔들림으로 토크가 불안정하고 진동이 발생한다. 이와 같이 결상으로 야기된 과도한 진동은 유도전동기와 부하에 손상을 주게 된다.

그림 3과 그림 4에서 유도전동기의 권선전류가 급격히 증가 하는 것을 볼 수 있다. 권선의 전류 증가는 권선 온도상승의 원인이 되며 심할 경우 전동기 권선이 소손된다.

### 3.2.2 단락사고

유도 전동기 단락사고는 2상 단락과 3상 단락을 시뮬레이션 하였다. 단락지점은 인버터 출력단과 유도 전동기 입력단 사이 선로에서 단락사고를 발생 시켰다.

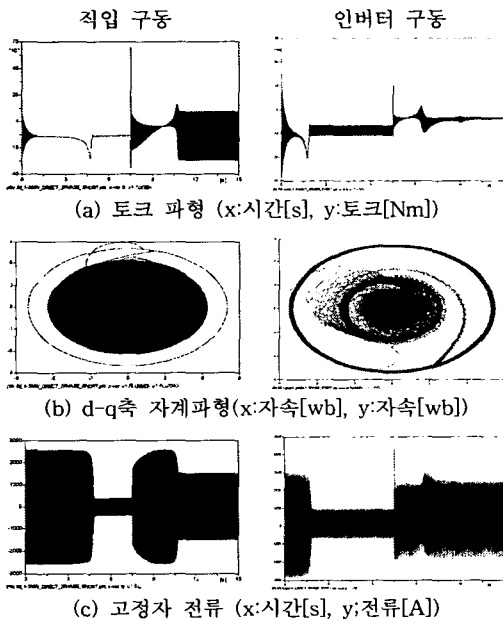


그림 5 각 구동방식에 따른 2상 단락사고시 나타나는 토크, d-q축 자계 및 전류파형

그림 5는 2상 단락사고 발생시 직입구동과 인버터 구동의 토크 및 d-q축 자계와 전류를 보여준다.

그림 6은 3상 단락사고 발생시 직입구동과 인버터 구동의 토크 및 d-q축 자계와 전류를 보여준다.

유도전동기의 단락사고는 선로단락 사고와 같이 과전류가 흐르게 되어 유도전동기의 권선의 온도를 급격히 상승시켜 소손되는데 이 과전류의 크기는 결상사고 발생 때 보다 더 큰 전류가 흐르게 된다.

그림 6의 (c)의 유도전동기 고정자 권선전류를 비교하면 직입구동 단락사고시 나타나지 않던 전류가 인버터 구동시 권선전류에서 나타난다. 이는 인버터 구동시 권선전류에 직류성분과 고조파가 포함되어 있어 단락사고 후 전동기 고정자 권선의 전류가 흐름을 볼 수 있다.

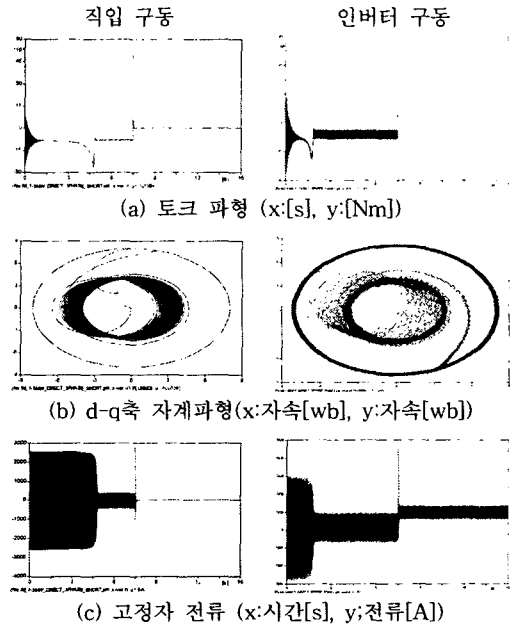


그림 6 각 구동방식에 따른 3상 단락사고시 나타나는 토크, d-q축 자계 및 전류파형

## 4. 결 론

본 논문에서는 직입구동과 인버터로 구동하는 유도 전동기에 대하여 정상상태, 결상사고 및 단락사고시에 상황을 EMTP로 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과를 이용하여 각각의 사고 상황에 대한 전류, d-q축 자계 및 토크 특성 곡선을 비교 분석하였다.

일반 정현파로 직입구동하는 유도전동기의 경우 d-q축 자계곡선이 깨끗한 원형을 이루는 반면 3레벨 인버터 구동 유도전동기의 경우 인버터 특성 때문에 d-q축 자계곡선이 두껍게 형성 된다.

결상사고 발생시 유도전동기는 회전을 계속 한다. 그러나 d-q축자계 곡선의 변화가 심하여 유도전동기는 진동이 커진다. 결과적으로 전동기와 부하는 진동으로 인한 손상을 입히게 된다. 단락사고 발생시 유도 전동기는 과전류가 흐르게 되어 전동기의 권선은 소손 된다.

정현파 직입구동 때 보다 인버터로 구동 할 때 전동기의 전류는 직류분과 고조파의 함유로 더 크게 흐르게 된다. 그러므로 결상사고나 단락사고 발생시 일반 정현파 구동할 때 보다 과전류로 인하여 전동기의 사고 여파가 더 크게 발생한다.

결과적으로 7-레벨 인버터를 사용하여 파형을 좀더 정현파에 가깝게 만들면 고조파의 유입을 줄여줄 수 있다. 따라서 유도 전동기에 흐르는 전류를 감소시켜 사고 발생시 영향을 줄일 수 있다.

## [참 고 문 헌]

- [1] E.A. EBRAHIM, N. HAMMAD "Fault Analysis of Current-Controlled PWM-Inverter Fed Induction Motor Drives" Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, pp1065-1070, 2003
- [2] 송승엽, 김재철, 신중은, 권영목, 황돈화 "EMTP를 이용한 인버터 구동 고압 유도전동기의 스위칭 써지 특성 분석" 한국조명·전기설비학회 2004춘계학술대회 논문집 pp68-62, 2004
- [3] ATP Rule Book, ATP solford Version of EMTP. Vol1.2, Leuven EMTP Center, 1987
- [4] Charles I. Hubert, "ELECTRIC MACHINES", Prentice Hall, pp133-277, 2002