

EMTP를 이용한 인버터 구동 고압 유도전동기의 스위칭 써지 특성 분석

(The Analysis on the Switching Surge of High-voltage Induction Motor fed by Inverter Using EMTP)

송승엽* · 김재철 · 신중은 · 권영목(숭실대학교) · 황돈하(한국전기연구원)

(Song Seung-Yeop, Kim Jae-Chul, Shin Joong-Eun, Kwon Young-Mok, Don-Ha Hwang)

Abstract

The PWM inverter drive may cause motor terminals voltage surge and oscillation(ringing), which impose severe electric stresses on inter-turn insulation of motor windings. This paper describes the technique used to simulate the problems associated with the use of PWM ASD's(Adjustable Speed Drive) to drive induction motor. The characteristic of switching surge was analyzed by EMTP(Electromagnetic transient program) model. The effects of switching surge by surge impedance, rise-time and cable lengths are also discussed.

1. 서론

최근 전력 전자 기술의 발전으로 고속 스위칭 소자가 개발됨으로써 가변속 주파수 전원으로 구동하는 유도전동기가 광범위하게 사용되고 있다. 특히 PWM 인버터로 구동되는 유도전동기가 산업용 속도 제어 설비의 핵심으로 자리잡게 되었다. 또한 대형 유도전동기에도 가변속 구동 시스템의 사용이 늘어나고 있는 추세이다.

고속 스위칭 소자의 높은 스위칭 주파수는 빠른 상승 시간과 높은 전압 상승률을 발생함으로써 유도전동기의 권선에 심각한 전압 스트레스를 야기시킨다[3].

본 논문에서는 전자계 과도해석 프로그램(ETMP)를 이용하여 인버터 구동 고압 유도전동기를 시뮬레이션 하였다. 특히 가변속 구동장치의 인버터를 구형파 인버터, PWM 인버터로 구분하여 고조파 스펙트럼 분석을 하였으며, multi-level inverter중 H-Bridge cascaded 7-level 인버터를 모델링하여 고조파 스펙트럼을 분석함으로써 시스템적인 해결방안을 제시하였다.

유도전동기의 과전압을 발생시키는 스위칭 써지에 대한 특성을 분석하기 위해 스위칭 써지에 영향을 주는 요소들에 대해 사례연구를 하였다.

2. 가변속 구동장치 모델링 및 고조파 스펙트럼 분석

부하의 속도를 조절함으로써 에너지를 효율적으로 사용하고자 하는 방안으로 전동기 속도제어를 위한 스위칭 기술이 점차 발전하고 있다. 본 논문에서는 실제 시스템

과 같이 모의하기위해 전자계 과도해석프로그램(EMTP)를 사용하였다. 그림 1은 EMTP를 이용한 가변속 구동장치의 구성도로서 스위칭 회로, 유도전동기, 제어시스템을 보여준다.

스위칭 회로는 다이오드 브리지 정류기, DC-link단, 전압원 인버터로 구성되며, 제어시스템은 EMTP의 서브루틴인 TACS(Transients Analysis of Control System)을 사용하였으며, 회전기는 UM model을 이용하였다.

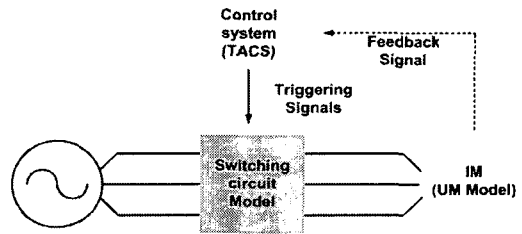


그림 1 가변속 구동장치의 EMTP 구성도
Fig. 1 Configuration of ASD Using EMTP

2.1. 가변속 구동장치 모델링

본 논문에서는 DC-link단에 인가되는 전압을 이상적인 DC 전압이라고 가정하여 시뮬레이션 하였다.

구형파 인버터인 경우 자체로는 출력 전압 크기를 제어할 수 없기 때문에 직류 입력전압을 제어해야 한다. 따라서 출력에서 기본 주파수의 선간 전압을 식(1)로부터 산출하였다. PWM 3-level 인버터의 경우 일정한 입력전원을 기지고 크기와 주파수에서 3상 출력 전압을 만들어 제어한다. 따라서 120°의 전압 위상차 때문에 기본 주파수에서 선간 전압은 진폭변조비(m_a)를 고려하여 식

(2)로 산출하였다.

$$V_{dc} = \frac{\sqrt{2}\pi}{2\sqrt{3}} V_{LLrms} \quad (1)$$

$$V_{dc} = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}m_a} V_{LLrms} \quad (2)$$

그림 2와 그림 3은 전압원이 이상적인 직류라고 가정하고 47.619[Hz]로 부하를 가변속 했을 경우, 구형파 인버터와 PWM 3-level 인버터의 출력 전압을 보여준다.

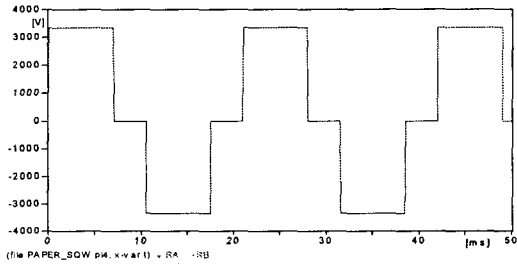


그림 2 구형파 인버터의 선간 출력전압
Fig. 2 Line-to-line output voltage of square wave inverter

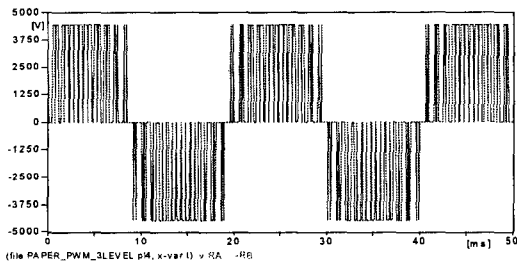


그림 3 PWM 3-level 인버터의 선간 출력전압
Fig. 3 Line-to-line output voltage of PWM 3-level inverter

2.1. 고조파 스펙트럼 분석

그림 4와 그림 5는 구형파 인버터와 PWM 3-level 인버터의 고조파 스펙트럼이다.

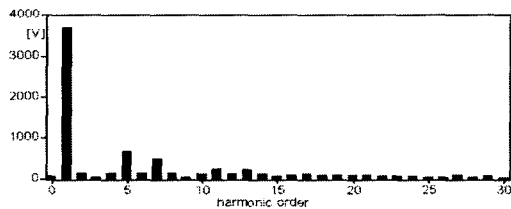


그림 4 구형파 인버터의 고조파 스펙트럼
Fig. 4 Harmonic spectrum of square wave inverter

구형파 인버터의 고조파 스펙트럼 분석결과 저차의 고조파가 지배적이다.

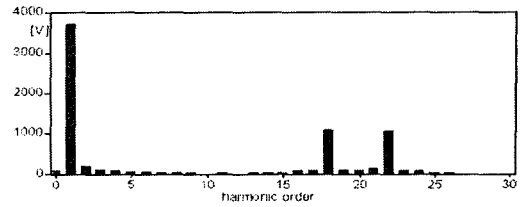


그림 5 PWM 3-level 인버터의 고조파 스펙트럼
Fig. 5 Harmonic spectrum of PWM 3-level inverter

PWM 3-level 인버터는 고차의 고조파에 지배적이다. 전력용 스위칭 소자와 제어기술의 발달로 PWM 인버터를 이용한 직접 구동방식이 증가하고 있으며, 정격 전압이 높은 고압 유도전동기에서는 multi-level 인버터를 응용하는 방법이 확대되고 있다. 본 논문에서 이런 multi-level중 전압 분배와 소자 이용률이 장점인 H-Bridge cascaded 7-level 인버터를 시스템적인 대안으로 시뮬레이션하였다.

H-Bridge cascaded 7-level 인버터는 상전압 출력이 7개의 레벨로 나타나는 인버터로써 다이오드 정류기와 2-level H-Bridge 인버터로 구성된 파워셀이 각 상마다 3개씩 직렬로 연결되어 있는 형태이다. 그림 6과 그림 7은 H-Bridge cascaded 7-level 인버터의 상전압과 선간 전압을 나타낸다.

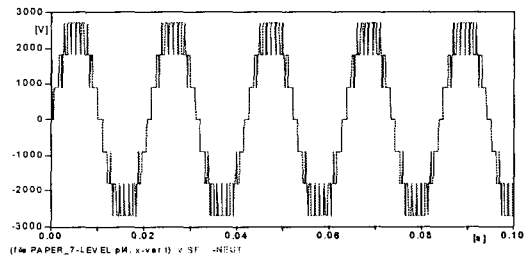


그림 6 H-Bridge cascaded 7-level 인버터의 상전압
Fig. 6 Phase-to-ground output voltage of H-Bridge cascaded 7-level inverter

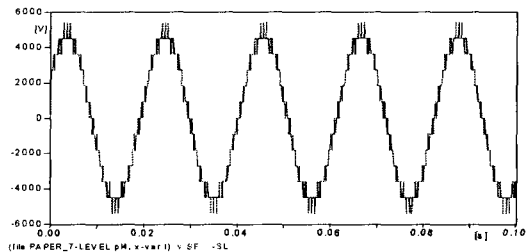


그림 7 H-Bridge cascaded 7-level 인버터의 출력 선간전압
Fig. 7 Line-to-line output voltage of H-Bridge cascaded 7-level inverter

그림 8은 H-Bridge cascaded 7-level 인버터의 고조파 스펙트럼을 보여준다. PWM 3-level 인버터에 비해 정현파에 가까운 고조파 스펙트럼을 얻을 수 있었다.

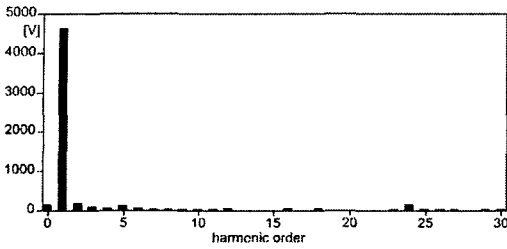


그림 8 H-Bridge cascaded 7-level 인버터의 고조파 스펙트럼
Fig. 8 Harmonic spectrum of H-Bridge cascaded 7-level inverter

3. 고압 유도전동기 모델링

EMTP에는 두 종류의 회전기 모델이 있는데 하나는 3상 평형 동기기만 모델링할 수 있는 SM(Synchronous machine) 모델과 유도기, 직류기, 동기기등 12종류의 회전기들을 모델링할 수 있는 UM(Universal Machine) 모델이 있다.

UM Model은 전기적인 회로는 d-q-0축으로 표현하나 기계적인 요소는 전기회로로 유사화하여 표현한다. 표 1은 전기계와 기계계사이의 상호관계를 나타낸다[6].

표 1. 1500(kW) 유도전동기 사양
Table 2 Specification of 1500(kW) induction motor

Mechanical	Electrical
T (Torque on Mass)	I (Current into Node)
ω_m (Angle Speed)	V (Node voltage)
θ_m (Angle)	Q (Capacitor charge)
J (Moment of inertia)	C (Capacitance to ground)
K (Spring constant)	Y_L (Reciprocal of Inductance)
D (Viscous Damping)	Y_R (Conductance)

전기계와 기계계를 결합한 시스템인 그림 1에서의 운동방정식은 식(3)과 같다.

$$T_m = J \frac{d\omega_m}{dt} + D\omega_m + T_e \quad (3)$$

식 (3)을 전기적 방정식으로 바꾸면 식(4)와 같이 된다.

$$I_m = C \frac{dV_m}{dt} + \frac{V_m}{R} + I_e \quad (4)$$

그러므로 전동기 관련 데이터는 전기계로 변환하여

입력시켜야 한다. 또 부하가 요구하는 부하토크를 전기적인 변수로 변환할 경우 전동기는 부(-)로, 발전기는 정(+)으로 된다.

본 논문에서는 EMTP의 UM model을 이용하여 유도전동기를 모델링하였다. 해석하고자 하는 모델링의 파라미터는 표 2에 나타내었다.

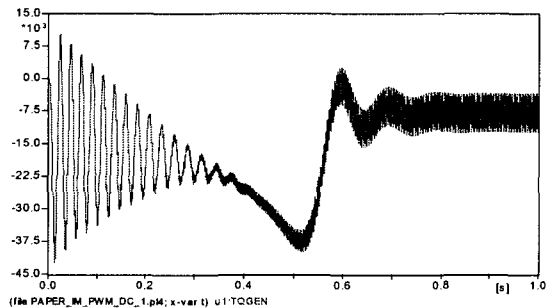
표 2. 1500(kW) 유도전동기 사양
Table 2 Specification of 1500(kW) induction motor

Rating	1500[kW], 3300[V], 6p, 60[Hz], 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]
switching frequency	1[kHz]	
moment of inertia	78.5[kg · m ²]	

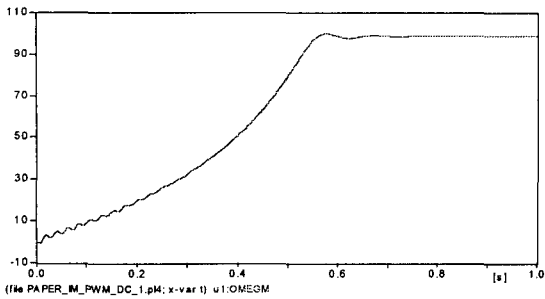
그림 9는 PWM 3-level 인버터 구동 고압 유도전동기를 스위칭 주파수 1[kHz]로 하고 운전주파수를 47.619[Hz]로 부하를 가변속 운전할 때의 토크 및 회전속도, 고정자 전류를 보여준다.

그림 9 (a)는 토크 파형으로 정상상태 진입시 0을 기준으로 negative 영역에 있으므로 전동기로 동작하며, (b)의 회전속도는 99.73[rad/s]로 고조파에 거의 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다. 또한 (c)의 고정자 전류는 고조파의 영향으로 중첩된 리플을 가진 전류를 발생하고 있으며, 피크 전류는 약 558.97[A]이다.

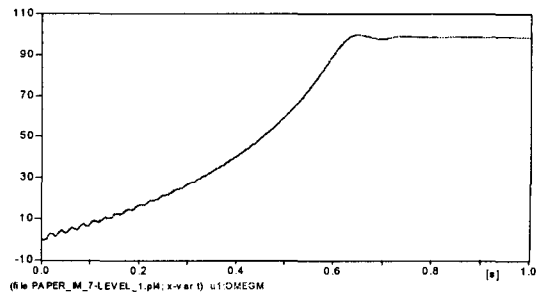
그림 10은 H-Bridge cascaded 7-level 인버터로 고압 유도전동기를 스위칭 주파수 1[kHz]로 하고 운전주파수를 47.619[Hz]로 부하를 가변속 운전할 때의 결과를 보여준다.



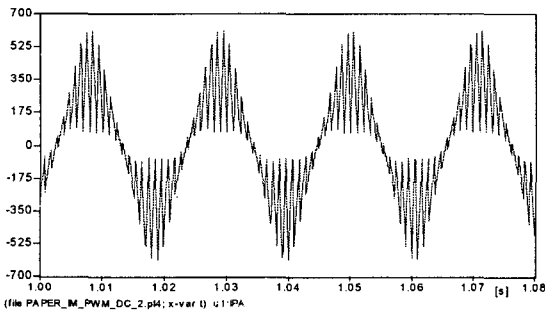
(a) 토크 파형 (x:[s], y:[Nm])
(a) Torque waveform (x:[s], y:[Nm])



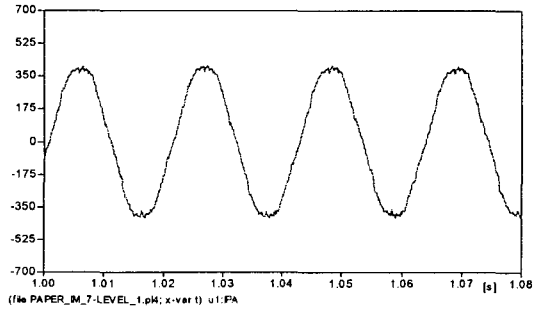
(b) 회전자 속도 (x:[s], y:[rad/s])
(b) Rotor speed (x:[s], y:[rad/s])



(b) 회전자 속도 (x:[s], y:[rad/s])
(b) Rotor speed (x:[s], y:[rad/s])



(c) 고정자 전류 (x:[s], y:[A])
(c) Stator current (x:[s], y:[A])

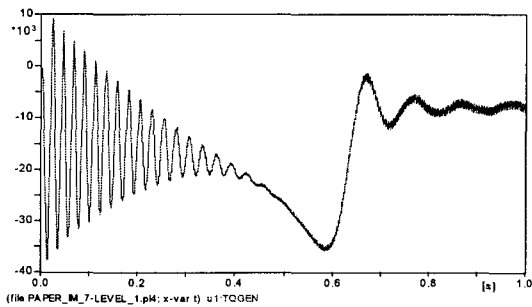


(c) 고정자 전류 (x:[s], y:[A])
(c) Stator current (x:[s], y:[A])

그림 9 PWM 3-level 인버터 구동 유도전동기
Fig. 9 Induction motor fed by PWM 3-level inverter

그림 10 H-Bridge cascaded 7-level 인버터 구동 유도전동기
Fig. 10 Induction motor fed by H-Bridge cascaded 7-level inverter

그림 10의 토크파형은 정상상태에서 토크 맥동크기가 작아졌으며, 보다 매끄러운 파형을 보인다. 회전속도는 99.07[rad/s]이며 고정자 전류 또한 정현파에 가까우며 고조파의 영향이 적다. 피크 전류는 405.03[A]이다.



(a) 토크 파형 (x:[s], y:[Nm])
(a) Torque waveform (x:[s], y:[Nm])

4. 사례 연구별 분석

유도전동기 고정자 권선에 과전압을 발생시키는 스위칭 써지에 영향을 주는 요소들에 대해 사례연구를 하기 위해 인버터-케이블-유도전동기 모델의 등가회로를 모델링하였다. 모터의 써지임피던스는 몇몇 논문에서 있는 값을 이용하였다[1-3]. PWM 파형을 모델링하기 위해 EMTP의 램프함수를 이용하였으며, 케이블 정수는 KSC 3131을 이용하여 EMTP의 Cable Constants routine으로 구하였다. 케이블 회로는 주파수 독립 분포 정수회로로 모델링하였다.

그림 11은 램프함수의 상승시간을 0.1[μs], 케이블 길이를 100[m]로 가정하였을 때, 모터의 써지임피던스별 스위칭 써지의 피크전압을 나타낸다. 모터의 써지임피던스가 커질수록 피크전압이 상승한다.

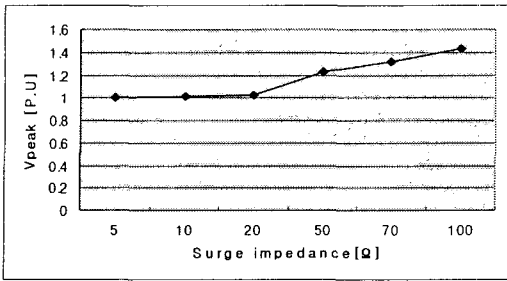


그림 11 모터의 써지임피던스에 대한 모터 입력단자의 피크 전압
 Fig. 11 Maximum voltage at motor terminals for various surge impedance

그림 12은 모터의 써지임피던스를 70[Ω], 케이블 길이를 100[m]로 가정하였을 때, 램프함수의 상승시간에 따른 피크전압을 나타낸다.

상승시간이 길수록, 모터 입력단자의 피크전압은 낮아진다는 것을 알 수 있다.

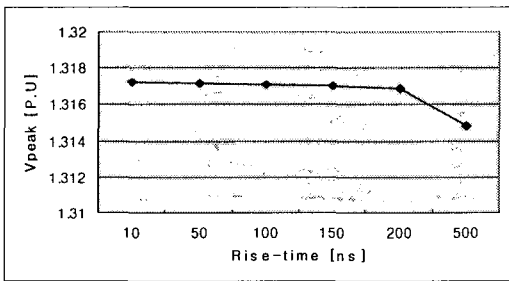


그림 12 상승시간에 대한 모터 입력단자의 피크 전압
 Fig. 12 Maximum voltage at motor terminals for various rise-time

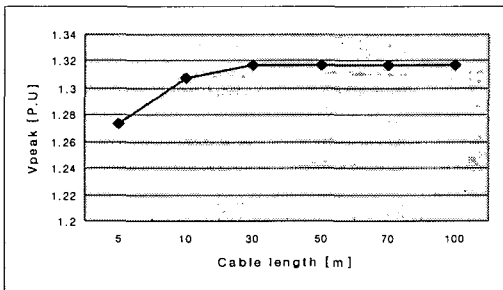


그림 13 케이블 길이에 따른 모터 입력단자의 피크 전압
 Fig. 13 Maximum voltage at motor terminals for various cable lengths

그림 13은 램프함수의 상승시간을 0.1[μs], 모터의 써지 임피던스를 70[Ω]으로 가정하였을 때, 케이블 길이에 따른 모터 입력단자의 피크전압을 나타낸다.

케이블이 길어질수록 모터 입력단자에서의 피크전압은 증가함을 나타낸다.

5. 결 론

본 논문에서는 인버터 구동 고압 유도전동기의 스위칭 써지에 대한 특성을 분석하였다.

가변속 구동시스템의 고조파 분석을 통한 시스템적인 저감을 위해 multi-level 인버터중 H-Bridge cascaded 7-level 인버터를 모델링하여 비교 분석하였다. 또한 고조파에 의한 고압 유도전동기의 특성을 보였다.

스위칭 써지에 대한 특성을 분석하기 위해 EMTP 해석용 시스템 모델을 제안, 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

모터의 써지 임피던스가 클수록, 상승시간이 짧을수록, 케이블 길이가 길어질수록 스위칭 써지 전압은 커진다.

결과적으로 이런 스위칭 써지 전압에 견딜수 있도록 인버터 구동 고압 유도전동기의 절연내력을 개선하여야 한다.

감사의 글

본 논문은 에너지 관리공단의 연구비 지원으로 진행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] H.A. Toliyat, G. Suresh and A. Abur, "Simulation of voltage stress on the inverter fed induction motor winding supplied through feeder cable", IEEE Industry application Conference, pp.143-150, 1997
- [2] D.H. Hwang, D-Y. Park and Y-J. Kim, "Analysis of insulation characteristics of low-voltage induction motor driven by IGBT PWM inverter", IEEE ISB conference Record, pp.17-20, 2000
- [3] Christopher J. Melhorn and Le Tang, "Transient effect of PWM drives on Induction motor", IEEE Trans on Industry Application conference pp.1065-1072, 1997
- [4] 김종겸, 이은용, "전자계 과도 해석 프로그램을 이용한 가변속 구동시스템의 특성 해석", 대한전기학회 논문지, 제 47호, 8호, 1998
- [5] Muhammad H. Rashid, "Power electronics handbook", Academic Press, 2001
- [6] ATP Rule Book, ATP solford Version of EMTP. Vol1, 2, Leuven EMTP Center, 1987