

가변속 드라이브의 사용에 따른 스위칭 서지전압 측정

김종겸, 이은웅, 김일중  
 원주대학, 충남대학, 주성대학

A Measurement of Switching Surge Voltage using Adjustable Speed Drives

Kim Jong-Gyeum, Lee Eun-Woong, Kim Il-Joong

**Abstract** - Most adjustable-speed drives (ASDs) designed to operate 220[V] induction motors incorporate voltage-source inverters (VSIs), which create motor voltages at high switching frequencies. The motor leads used to connect an ASD to a motor can behave like transmission lines for voltage pulses, which can be reflected at the motor terminals. The resulting oscillatory transient, known as the long-lead effect, can stress and consequently degrade the stator insulation system of a motor. This paper describes the results of tests to 1) determine the correlation between peak motor voltage and the length of motor leads and 2) determine the correlation between peak motor voltage and the switching frequency of the ASD

1. 서 론

전력전자 스위칭 소자의 성능향상은 높은 주파수 스위칭 동작을 가능하게 하였으며, PWM 인버터의 동작을 개선시켜 자체 손실의 저감은 물론 전동기의 원활한 속도 조정으로 에너지를 효율적으로 관리할 수 있게 하였다.

산업현장에 사용되고 있는 중소형 유도전동기 대부분의 가변속 제어장치는 스위칭 주파수가 높은 IGBT를 채용한 PWM 전압형 인버터를 사용한다. 전동기를 가변속 운전할 경우 빠른 스위칭 동작기능을 가진 소자의 인버터 출력측에서 발생하는 급준도의 펄스 파형이 전동기 단자에 전압스트레스로 전달되어 고장자 권선 절연고장을 일으킬 수 있다[1-5].

전동기의 권선 절연에 영향을 미치는 요소로는 전압의 크기뿐만 아니라 운전동안의 반복적인 스트레스 성분이므로 전압파형의 급준도를 낮추고 반복횟수를 줄여야 한다.

사용하는 인버터와 사용전동기의 특성결합에 따라 부하측 단자에 발생하는 전압 파형이 다르게 나타날 수 있기 때문에 과전압의 영향을 줄여 전동기의 수명이 최대한으로 보장할 수 있도록 하는 것이 바람직하다.

따라서 본 논문은 저압 부하설비에서 전압형 PWM 인버터를 이용해서 유도전동기를 속도 제어할 경우 스위칭 주파수, 케이블 길이 변화 효과와 전동기 입구단에 나타나는 스위칭서지 전압의 크기를 측정 분석하였다.

2. 전압반사 이론과 크기

2.1 전압반사 이론

인버터에서 발생한 펄스파형이 케이블을 통해 전동기에 전달될 경우 거울의 반사와 같이 케이블과 전동기의 서지임피던스에 의한 반사계수의 영향으로 펄스폭의 지속동안 계속 진행하게되므로 전송선의 진행과로 해석한다[1,4].

인버터의 출력측에서 발생한 전압  $E_i$  가 케이블을 거쳐 전동기 단자에 전달될 경우 임피던스 부정합에 의해 반사되는 전압  $E_r$  은 식(1)과 같다.

$$E_r = \tau_L \times E_i \quad (1)$$

이때 전동기 단자에 반사되고 피크 전압에 추가되는

펄스전압의 크기는 전동기 저항, 케이블 인덕턴스 및 케이블 커패시턴스의 함수인 반사계수  $\tau_L$  로 결정된다.

$$\tau_L = \frac{Z_m - Z_c}{Z_m + Z_c} \quad (2)$$

여기서  $Z_m$  와  $Z_c$  는 각각 전동기와 케이블의 서지 임피던스로 식(3)과 같다.

$$Z = \sqrt{L/C} \quad (3)$$

반사계수는 10마력 이하 소형 전동기의 경우 0.9~1.0 이지만, 중대형의 경우 0.8 이하이다[2,4].

케이블과 전동기의 임피던스 부정합에 의해 인버터의 출력단에서 발생한 전압이 입사와 반사를 반복하여 최종적으로 전동기 단자에 나타나는 전압  $E_i$  은 식(4)가 된다.

$$E_i = \frac{2 \times Z_m}{Z_m + Z_c} \times E_i \quad (4)$$

전동기의 임피던스가 케이블의 임피던스에 비해 매우 크며 ( $Z_m \gg Z_c$ ), 특히 소형전동기의 경우는 매우 크기때문에 임피던스 값을 무한대 또는 개방으로 해석할수록 전동기 단자에 나타나는 전압은 인버터에서 발생한 전압의 거의 두배가 된다[4].

2.2 스위칭 전압의 크기

그림 1 은 PWM 인버터로 운전하는 가변속 드라이브의 인버터 출구측 및 전동기 입구 단에서의 전압 파형을 나타낸 것이다. 인버터 출구측에서의 전압은 거의 구형파에 가깝지만, 전동기 입구단에서의 전압 파형은 직류버스 전압보다 매우 높은 전압의 발생으로 전동기 절연에 나쁜 영향을 미칠 수 있다.

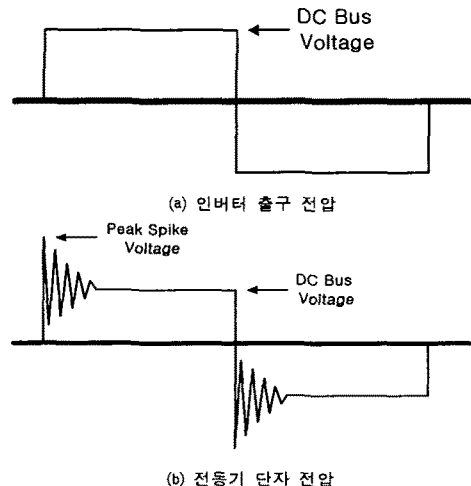


Fig. 1 Voltage Waveform at PWM Inverter Operation

인버터 출력 펄스의 빠른 상승시간과 인버터와 전동기

사이 케이블 길이가 긴 경우 직류 버스 전압의 거의 두배 또는 그 이상에 상당하는 과전압 반사를 그림 1(b)처럼 일으킬 수 있다. 그림 1(b)에서 펄스의 시작부분에서 높은 스파이크가 발생하는 이유는 인버터와 전동기 사이에 존재하는 전송선의 전압과 반사 때문이다. 이 스파이크의 높이에 영향을 주는 변수로서는 케이블과 전동기의 서지임피던스의 크기와 인버터에서 전류의 온 오프 시 전압 상승시간, 그리고 케이블 길이의 함수로 나타내는 선로 임피던스 등이 있다.

### 3. 스위칭 서지 전압 측정 및 결과 분석

그림 2는 팬 부하 구동용 220[V] 3마력 유도전동기의 전압형 PWM 인버터 구성도이다. 측정에 사용한 150 [MHz] 디지털 오실로스코프의 전압프로브는 100:1인 것을 사용하였다. 또한 급전선용 저압 케이블은 600[V] CV 3.5[mm]×3C를 채택하였다.

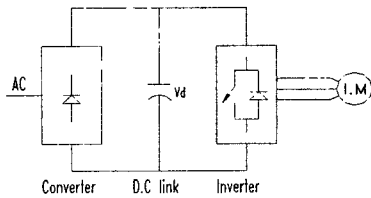


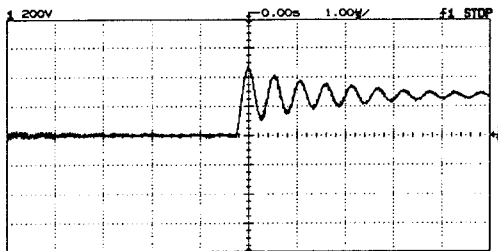
Fig. 2 PWM Inverter System

인버터 스위칭에 의해 전동기 단자에 나타나는 전압의 크기 및 준도에 영향을 미치는 소자의 스위칭 주파수, 케이블 길이 등을 변화시키면서 측정하였다.

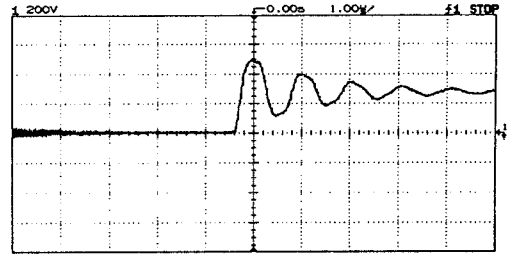
#### 3.1 케이블 길이의 영향

급준파 스위칭 서지전압은 인버터의 스위칭 주파수와 크기와 케이블의 길이에 따라 높아지고 전동기 권선에 미치는 영향도 지속적이기 때문에 인버터에서 전동기까지의 거리는 가능한 짧을 수 있도록 설치하는 것을 권장한다. 그러나 인버터로 전원을 공급하는 저압 전원제어실에서 부하까지의 거리는 현장 여건에 따라 수[m]에서 수십[m]에 이르는 경우가 많다.

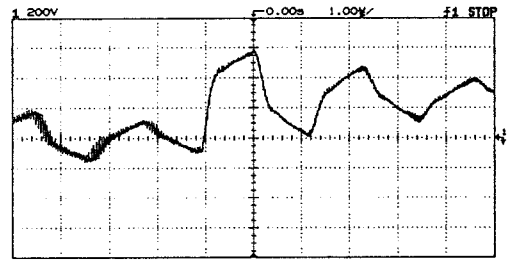
그래서 본 연구에서는 스위칭 주파수를 10[kHz]로 고정된 전용 PWM 인버터로 팬 부하용 3상 220[V] 3마력 유도전동기를 운전주파수는 50[Hz]로 운전시키면서 케이블 길이에 따라 전동기 단자에 나타나는 전압 파형을 측정하였다. 펄스의 변화비율과 크기를 상세하게 확인하기 위해 시간축의 간격을 1[μs]로 하고 전압은 200[V/div]로 정하였다.



(a) 10[m] 10kHz



(b) 30m 10kHz



(d) 100[m] 10kHz

Fig. 2 Load side voltage due to cable length

스위칭 주파수를 고정하고 케이블 길이를 변화시킬 경우 펄스 하강 및 상승 에지(edge)부분에서 매우 빠른 전압 변화를 나타내는 링잉(ringing)현상이 케이블 길이가 짧을수록 많이 나타남을 그림 2에서 알 수 있다. 케이블 길이를 증가시킬 경우 링잉 횟수는 줄어들고, 50[m]까지에서 크기는 1.68[pu]였지만, 100[m]에서는 거의 2[pu]에 가까운 전압이 전동기 입구단에 나타났다. 즉 케이블 길이를 증가할수록 더욱 큰 전압이 나타나게 된다. 따라서 가변속 운전을 위해 인버터와 전동기 사이 케이블 길이는 스위칭 서지전압의 크기에 대한 대책을 고려하여 선정할 필요가 있다.

#### 3.2 스위칭 주파수의 영향

가변속 구동용 PWM 인버터의 경우 전동기를 부드럽게 운전 및 제어시키면서 효율을 높이기 위해서 스위칭 주파수가 높은 전력전자 소자를 개발 사용하고 있다. 인버터의 스위칭 주파수의 증가에 의한 빠른 전압변화 ( $dv/dt$ )는 전송선 이론에서 케이블과 전동기의 임피던스 차에 의한 반사계수의 크기에 따라 전동기 단자에 전압 오프슈트를 일으킬 수 있고, 전동기 권선절연 손상으로 이어져 전동기 수명을 단축시킬 수 있다.

케이블 길이 변화시 부하측에 높은 전압 피크를 발생한 케이블 길이 100[m]와 운전주파수 60[Hz]에서 스위칭 주파수를 10, 12 및 14[kHz]로 변화시키면서 전동기 입구단에서의 전압파형 측정결과를 그림3에 나타내었다.

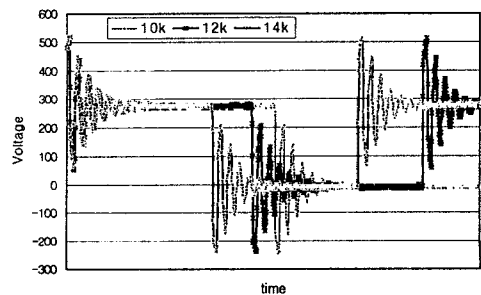


Fig. 3 Load side voltage due to switching frequency

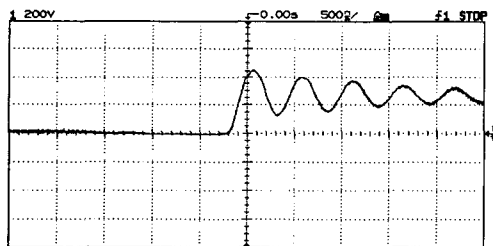
스위칭 주파수를 증가시켜도 전압의 크기는 변화 없으나, 같은 시간에 발생하는 펄스수가 증가하기 때문에 전동기에 미치는 반복전압 스트레스 영향이 높아짐을 그림 3에서 알 수 있다. 즉, 이것은 스위칭 주파수가 높은 전력변환소자의 도입시 전압상승 변화 비율에 해당하는 펄스가 전동기 권선에는 전달되므로 전동기 권선 절연에 나쁜 요소로 작용한다.

### 3.3 필터의 영향

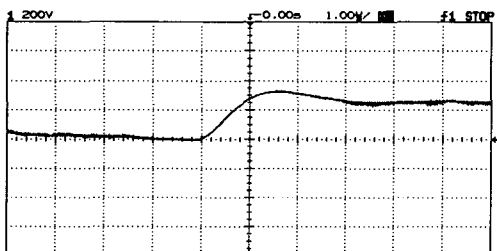
케이블 서지 임피던스는 전동기에 비해 매우 낮기 때문에 반사계수가 높아 인버터 스위칭 동작에 의한 급준파의 전파는 전동기 입구단에서의 높은 전압을 낳는다. 출력 리액터의 기능은 전압펄스의 고주파 성분을 줄이는 기능을 가지고 있으므로 전동기 단자 가까운 곳에 설치할 경우 인버터에서 발생한 펄스의 형상은 각 펄스의 상승 예지부분의 빠른 변화를 완화시켜 전압의 크기를 낮출 수 있다.

앞서 측정된 결과에서 인버터의 스위칭 주파수나 운전 주파수의 변화시 전동기 단자에 나타나는 전압의 크기는 전동기 권선 절연에 거의 영향을 주지 않았다. 그러나 케이블 길이에 따라서는 전압의 크기에 큰 영향을 나타내었다. 따라서 인버터의 스위칭 주파수는 일정하게 고정하고서 케이블 길이에 따라 전동기 단자에 나타나는 전압의 크기를 완화하기 위해 필터의 효과를 확인하는 것이 매우 중요하다.

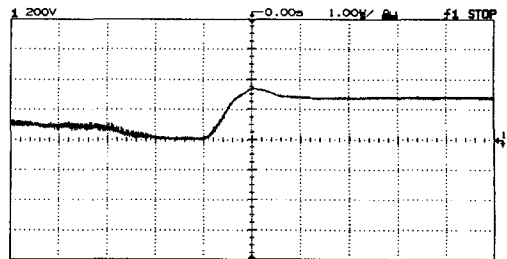
스위칭 주파수 10[kHz]와 운전주파수 60[Hz]에서 링잉현상이 매우 크게 작용한 케이블 길이 10[m]의 인버터의 출력측 및 전동기 단자에 0.56[mH]의 리액터 필터의 설치전후에 대해 전동기 입구단의 전압 측정파형은 그림 4와 같다.



(a) no filter



(b) with filter at inverter terminal



(c) with filter at motor terminal

Fig. 4 Voltage Waveform of Load side due to Filter

이 그림 4에서 인버터 출력측 및 전동기 단자에 필터를 부착하면 급준파의 서지전압의 급증도는 매우 완화되고, 링잉현상은 거의 해소되는 동시에 전압의 크기도 줄어듦을 알 수 있다. 단지 인버터 출력측에 필터를 설치하는 경우 전압피크에 도달하는 상승시간에 차이가 날뿐이다.

## 4. 결 론

본 연구는 산업현장에서 전동력에너지를 효율적으로 운영하기 위해 사용되는 PWM 전압형 인버터의 스위칭 전압에 대한 영향을 스위칭 주파수와 케이블 길이를 변화시키고 필터를 부착시켜서 측정 분석한 것이다.

전동기의 원활한 속도제어와 인버터의 효율을 높이기 위해 스위칭 주파수가 높은 전력반도체 소자를 사용할 경우 인버터의 출력측에서 발생한 급준한 전압이 케이블을 통해 전동기 단자에 침입하여 전동기 절연에 큰 영향을 미칠 수 있다.

측정결과 전동기 권선 절연에 영향을 주는 요소로서 스위칭 주파수가 높은 경우 링잉현상의 발생확률이 높았으며, 스위칭 주파수의 고정시 케이블 길이가 증가함에 따라 전압의 변화비율보다는 크기에 많은 영향을 받음을 확인하였다. 또한 인버터의 부하측 및 전동기 단자에 교류 필터를 연결하여 운전하면 케이블 길이 증가에 따라 발생한 링잉현상의 제거와 전압크기를 감소시킬 수 있어 인버터에 의한 전압스트레스 문제가 해소될 수 있음을 확인하였지만, 케이블 길이가 매우 긴 경우에는 필터를 전동기 입구단에 설치하는 것보다는 인버터 입구측에 설치하는 것이 전압스트레스 제거 효과가 높다는 것을 확인하였다.

## (참 고 문 헌)

- [1] 김종겸, 이은웅, "진행파법에 의한 스위칭 서지전압 해석", 대한전기학회 논문지, 43권 8호, pp.1252-1258, 1994
- [2] E. Persson, "Transient effects in application of PWM inverters to induction motors", IEEE Trans on IAS, vol.28, pp.1095-1101, Sep/Oct. 1992
- [3] Austin H. Bonnet, "Analysis of the Impact of Pulse-Width Modulated Inverter Voltage Waveform on AC Induction Motors", IEEE Trans on IAS, vol.32, no.2, pp.386-392, Mar/Apr, 1996
- [4] 김종겸외 4인, "인버터 스위칭에 의한 전동기 권선의 전압 스트레스 해석", 대한전기학회 논문지, 46권 6호, pp.869-874, 1997
- [5] A. H. Bonnett, "Analysis of the impact of pulse-width modulated inverter voltage waveforms on AC induction motors", IEEE Trans on IAS, vol.32, pp.386-392, Mar/Apr. 1996