

### 전압형 인버터 스위칭 서지전압 측정

°김종경, 이은웅, 김일중  
원주대학, 충남대학교, 주성대학

## A Measurement of Switching Surge Voltage using Voltage Type Inverter

Jong-Gyeum Kim, Eun-Woong Lee, Il-Jung Kim  
Wonju College, Chungnam Uni., Juseong College

**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 amplified (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 Brief 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. Insulation failures like this usually are caused by voltage surges. Voltage surges are often the result of switching power circuits, lightning strikes, capacitor discharges and solid-state power devices.

있다. 높은 스위칭 속도와 제로 스위칭 동작기법은 기본적으로 PWM 인버터의 특성을 향상시키지만, 0.1[μs]이하의 전압상승의 높은 비율( $dv/dt$ )은 전동기 절연과 베어링에 부작용을 일으키고 케이블 길이가 긴 설비에서는 왜형된 파형을 낳는다[1,2,5].

전동기의 권선 절연에 영향을 주요한 요소로서는 전압의 크기뿐만 아니라 운전동안의 운전동안 반복적인 스트레스 성분이다. 또한 사용하는 인버터와 사용전동기의 특성에 따라 부하측 단자에 발생하는 전압파형이 다르게 나타날 수 있기 때문에 과전압의 영향을 줄여 전동기의 수명이 최대한으로 보장할 수 있도록 하는 것이 중요하다.

따라서 본 논문은 저압 부하설비에서 전압형 PWM 인버터를 이용해서 유도전동기를 속도 제어할 경우 인버터의 스위칭에 의해 전동기 입구단에 나타나는 스위칭 전압의 크기를 스위칭 주파수, 운전주파수 및 케이블 길이 변화시켜 측정할 다음 저감방안을 마련하였다.

### 1. 서 론

개선된 전력전자 스위칭 소자의 개발은 높은 주파수 스위칭 동작을 가능하게 하였으며, PWM 인버터의 동작을 개선시켜 전동기의 속도 조정으로 에너지를 효율적으로 관리할 수 있게 되었다. 이 인버터에 사용되는 소자의 경우 기존의 BJT, GTO나 MOSFET를 대신하여 수십[kHz]의 스위칭 주파수를 가진 IGBT 소자의 도입이 보편화되었으며 수백[kW]까지 사용이 가능한 소자도 개발되고 있다.

산업현장에 사용되고 있는 중소형 유도전동기 대부분의 가변속 제어에는 IGBT를 채용한 PWM 전압형 인버터를 사용한다. 이와 같이 빠른 스위칭 동작기능을 가진 소자의 가변속 운전할 경우 PWM 인버터 출력측에서 발생한 펄스 파형이 전동기 단자에 전달되어 고정자 권선 절연고장을 일으킬 수 있는데 이들 고장의 대부분은 인버터의 스위칭 동작에 의한 전압 스트레스 때문이다[1-6].

인버터 스위칭 동작에 의한 전동기 단자에 나타나는 피크 과전압은 케이블 길이가 증가하거나 빠른 파형의 준도가 높을 경우 직류 버스 전압의 거의 2배가 나타날 수 있다. 그러나 과전압의 실제 위험성이 전동기 권선에 영향을 나타내는 것에 대해 PWM 인버터를 설치할 때 문제로 인식하지 못하고 있다.

PWM 인버터와 전동기를 적용하는 현장에서 이들 사이 거리는 떨어져 있기 때문에 일정거리를 가진 케이블을 이용하고

### 2. 전압반사 이론과 영향

#### 2.1 전압반사 이론

전동기 속도제어를 위해 사용되는 전력반도체 소자의 경우 스위칭속도가 매우 빠르다. 속도제어를 부드럽게 하기 위해 사용하는 소자는 빠르게 턴온하므로 높은  $dv/dt$  를 가진 전압펄스를 발생한다. 이와 같은 소자가 인버터에 적용될 경우 발생한 펄스전압이 케이블과 전동기 임피던스와 결합으로 전동기 단자에서 전압 오버슈트를 발생한다. 이 오버슈트는 반복성이고, 연속적으로 일어나서 전동기 시스템 수명을 단축할 수 있다.

인버터에서 발생한 펄스 파가 케이블을 통해 전동기에 전달될 경우 케이블과 전동기의 서지임피던스에 의한 반사계수의 영향으로 거울의 반사와 같이 펄스 파형이 계속 진행하게 되므로 전송선의 진행파로 해석한다[1,4].

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

$$E_r = \tau_L \times E_i \tag{1}$$

전동기 단자에 반사되고 피크 전압에 추가되는 펄스 압

의 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.

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

10마력 이하 소형 전동기의 경우 반사계수는 대개 0.9~1.0이지만, 중대형의 경우 0.8이하이다.

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

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

전동기의 임피던스가 케이블의 임피던스에 비해 매우 크며, 특히 소형전동기의 경우는 매우 높은 값을 나타내므로 임피던스 값을 무한대 또는 개방으로 해석할 경우 전동기 단자에 나타나는 전압은 인버터에서 발생한 전압의 거의 두배가 된다[1,4].

실제 전동기 단자에 나타날 수 있는 피크전압의 크기를 결정하는 데에 펄스의 천이시간(빛의 전달속도 절반)이 1/3의 상승시간보다 크거나 같든지 또는 작음에 따라 달리 계산할 수 있다. 인버터에서 전동기 단자로 전파되는 파형의 천이시간( $t_t$ )은 사용 케이블의 비유전율  $\epsilon_r$  과 빛의 전파속도  $c$  의 관계에서 식(5)와 같이 전개할 수 있다 [4].

$$t_t = \frac{\sqrt{\epsilon_r} \times l_c}{c} = 6.67 \times l_c \text{ [ns]} \quad (5)$$

우선 케이블의 천이시간(transit time:  $t_t$ )이 상승시간(rise time:  $t_r$ )보다 늦을 경우 전동기 입구단에 나타나는 전압 피크값은 식(6)과 같고,

$$V_{peak} = \frac{3t_t}{t_r} \times (\tau_L + 1) \times V_{DC} \quad (6)$$

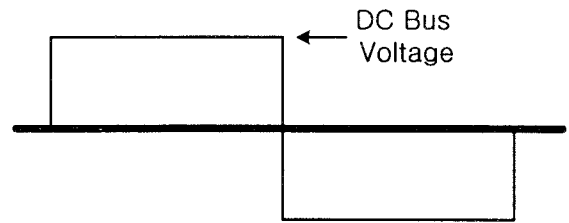
또한 천이시간이 1/3 상승시간보다 크거나 같을 때 전동기 입구단의 피크전압은 식(7)이 된다.

$$V_{peak} = (\tau_L + 1) \times V_{DC} \quad (7)$$

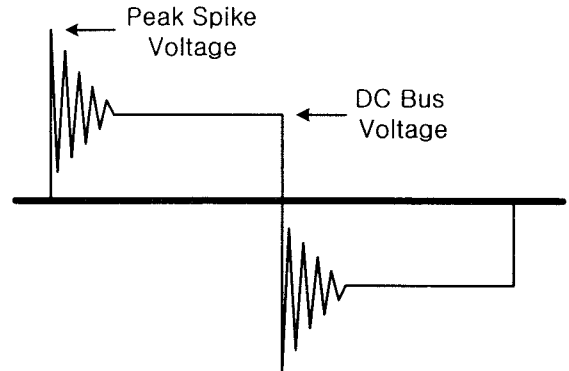
## 2.2 스위칭전압의 영향

전동기에 60[Hz] 정현파 전압을 인가할 때 베어링 절연열화 전압은 0.4~0.7[V]이지만, PWM 인버터의 빠른 스위칭 동작에 의한 에지(edge)는 8~15[V]로 그리스 절연내력을 초

과할 수 있는 정도로서 높은 절연열화전압은 높은 베어링 fleshover 전류를 발생시켜 짧은 시간에 베어링의 손상을 증가시킬 수 있다. 또한 공통 모드 노이즈(누설전류)는 저압 제어신호를 방해하고 차단회로를 오동작 시킬 수 도 있다[6]. 그림 1은 PWM 인버터로 운전하는 가변속 드라이브의 인버터 출구측 및 전동기 단자에서의 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. 이 전압은 링잉현상으로 부하의 운전동안 지속적으로 발생하며, 케이블 길이가 길거나 파형의 준도가 빨라짐에 따라 전압의 크기도 증가한다.



(a) 인버터 출구 전압



(b) 전동기 단자 전압

그림 1 PWM 인버터 운전시 전압 파형

Fig. 1 Voltage Waveform at PWM Inverter Operation

그림 1(b)와 같이 인버터 출력 펄스에서 빠른 상승시간과 인버터와 전동기 사이의 케이블 길이가 긴 경우는 직류 버스 전압의 거의 두배 또는 그 이상에 상당하는 과전압 반사를 일으킬 수 있다. 그림 1(b)에서 알 수 있듯이 펄스의 시작부분에서 높은 스파이크가 발생하는 이유는 인버터와 전동기 사이에 존재하는 전송선의 전압 파 반사 때문이다. 또한 스파이크의 높이에 영향을 주는 변수로서는 케이블과 전동기의 서지임피던스, 인버터에서 전류가 온-오프될 때의 전압 상승시간 및 케이블 길이의 함수인 라인임피던스 등이 있다.

## 2.3 전동기 권선절연

인버터에 의해 발생하는 서지전압의 영향을 줄이는 것도

중요하지만, 그 영향을 받는 권선절연문제에 대한 대비도 중요하다.

인버터 출력단에서 발생한 급준파 전압에 의한 전동기 권선절연 고장은 대지절연 고장, 상절연 고장 및 코일 또는 코일그룹 절연 고장중의 하나 또는 중복되어 발생한다. 그러나 이 중에서도 코일의 첫 번째와 마지막 턴사이 가장 큰 전위차가 존재하기 때문에 급준파가 도래했을 경우에는 턴간 절연고장이 가장 큰 영향을 받을 수 있다[1].

저압 유도전동기의 권선은 그림 2와 같이 난권(random wound) 또는 코일삽입(coil inserted)법을 사용하고 있는데 이것은 형권(form wound) 또는 슬롯내 권선(in-slot wound)법과는 달리 코일의 첫 번째 턴과 마지막 턴이 서로 매우 가까울 확률이 높아 급준도 서지전압의 전달될 경우 가장 큰 영향을 받는다[1,6]. 따라서 가변속 제어장치에 사용하는 전동기의 권선 작업시 높은 전압에 의한 영향이 최소가 되도록 해야 한다.

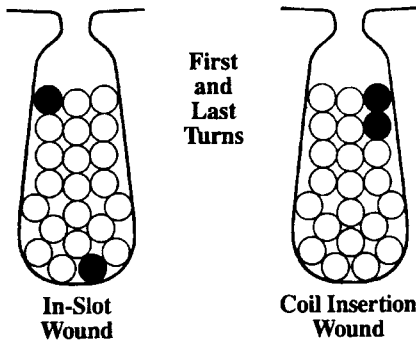


그림 2 저압 전동기의 권선법  
Fig. 2 Winding of low voltage motor

인버터에 의한 운전되는 저압 전동기의 전압스파이크는 1.6[kV/ $\mu$ s]로 NEMA 규정에 명시되어 있으나 인버터 스위칭 주파수가 높아짐에 따라 현재 보완하는 중이다.

### 3. 스위칭전압 측정 및 결과분석

그림 3 은 전압형 인버터로 유도전동기를 가변속 제어하는 저압회로의 계통도이다. 가변속 드라이브(ASD)는 팬 부하 구동용 220[V] 3마력 유도전동기용 PWM 인버터를 사용하여 전동기 단자에 나타나는 전압 파형 측정은 150 [MHz] 디지털 오실로스코프를 사용하였다. 또한 저압 케이블은 600[V] CV 3.5[mm] $\times$ 3C를 채택하였다.

인버터 스위칭에 의해 전동기 단자에 나타나는 전압의 크기 및 준도에 영향을 줄 수 있는 요소로서는 소자의 스위칭 주파수, 케이블 길이 및 운전 주파수이다.

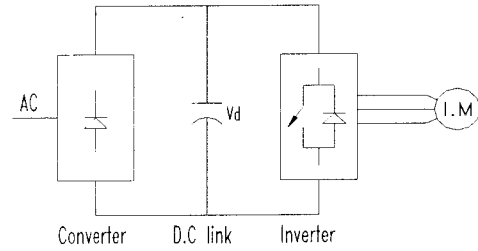


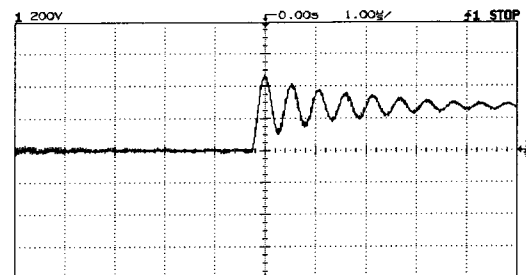
그림 3 PWM 인버터 시스템  
Fig. 3 PWM Inverter System

### 3.1 케이블 길이의 영향

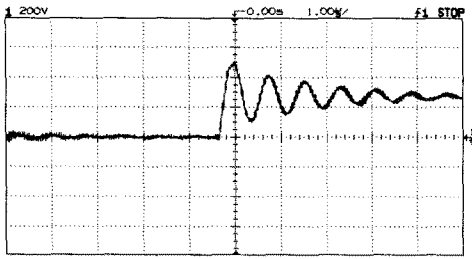
급준파 스위칭 서지전압은 인버터의 스위칭 주파수가 높아짐에 따라 더욱 높아지고, 전동기에 미치는 영향도 지속적이기 때문에 인버터와 전동기와의 거리는 가능한 짧은 것을 권장한다. 그러나 저압 전원 제어부에서 부하와의 거리는 현장 여건에 따라 수[m]에서 수십[m]에 이르는 경우가 많다. 사용부하인 전동기의 임피던스는 용량에 따라 그 값이 정해지지만, 부하에 전류를 통하는 케이블의 경우 길이에 따라 서지 임피던스가 달라진다. 따라서 인버터에서 발생한 급준파 전압이 케이블과 전동기의 서지임피던스에 의한 전파함수에 따라 크기가 다르므로 부하에 연결되는 거리에 따라 전압 파형의 크기를 알아보는 것이 매우 중요하다.

그래서 본 연구에서는 팬 부하용 3상 220[V] 3마력 유도전동기에 스위칭 주파수를 10[kHz]로 고정된 전용 PWM 인버터로 운전주파수는 50[Hz]로 운전할 경우 케이블 길이에 따라 전동기 단자에서의 전압 파형을 측정하였다. 펄스의 변화비율을 보다 상세하게 확인하기 위해 시간축의 간격을 1[ $\mu$ s]로 하였다.

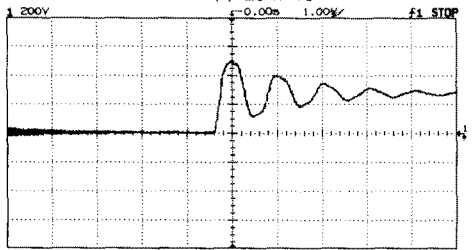
그림 4에서 알 수 있듯이 스위칭 주파수를 고정하고 케이블 길이를 변화시킬 경우 펄스 하강 및 상승 에지(edge)부분에서 매우 빠른 전압 변화를 나타내는 링잉(ringing)현상은 케이블 길이가 짧을수록 많이 나타남을 알 수 있다. 케이블 길이를 증가시킬 경우 링잉 횟수는 줄어들지만, 전압의 크기는 증가하므로 가변속 운전을 위해 인버터와 전동기 사이 케이블 길이를 선정할 경우에는 스위칭 서지 전압의 크기에 대한 대책을 마련할 필요가 있다.



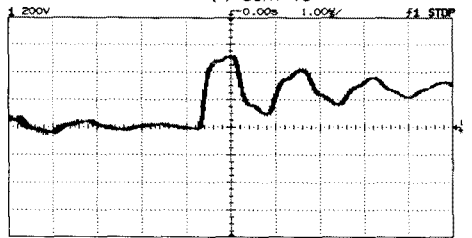
(a) 10[m] 10kHz



(b) 20m 10kHz



(c) 30m 10kHz

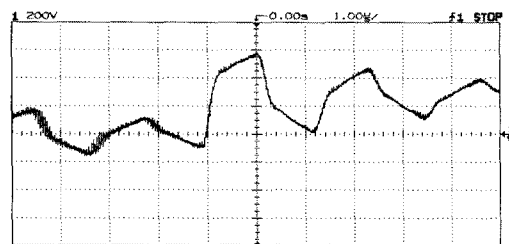


(d) 50m 10kHz

### 3.2 스위칭 주파수에 의한 영향

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

가변속 제어장치는 출력파형의 펄스폭과 펄스사이 시간을 변화시켜 전동기 평균전압을 조절하고 있다. 스위칭주파수



(e) 100[m] 10kHz

그림 4 케이블 길이에 따른 부하 측 전압 파형  
Fig. 4 Load side Voltage due to Cable Length

의 증가는 펄스간격시간을 줄이기 때문에 전동기 단자에서는 오버슈트 발생을 높일 수 있다. 인버터 스위칭주파수의 선택은 전동기 단자에 발생하는 오버슈트의 횟수를 결정할 수 있으므로 전압스트레스 해석을 위해 매우 중요하다. 스위칭주파수가 높을수록 전동기의 권선시스템에 스트레스를 작용하는 오버슈트의 회수와 크기는 증가한다. 만일 전동기의 피크전압정격이 오버슈트 레벨보다 높을 경우 스위칭주파수는 문제가 되지 않지만, 반대일 경우에는 스위칭주파수를 낮추어 운전할 필요가 있다.

부하측에 전달되는 스위칭 서지전압의 영향을 파악하기 위해 케이블 길이는 100[m], 운전주파수를 60[Hz]로 정하고서 스위칭주파수를 10, 12 및 14[kHz]로 변화시켜 측정 한 결과는 그림 5와 같다. 급준파의 준도를 구분하기 위해 1펄스 파형만을 비교하였다. 그러나 전압 파형의 측정에서 스위칭 주파수에 따라 부하 측에 나타나는 피크전압의 경우 순시요소부의 성분을 지니고 있어 크기를 포착하는데 어려움이 있었다.

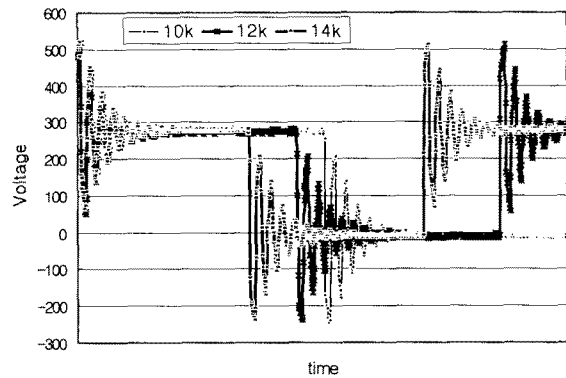


그림 5 스위칭 주파수에 따른 전압 파형  
Fig. 5 Load side voltage due to switching frequency

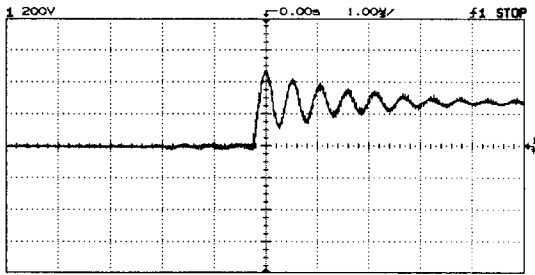
그림 5에서 알 수 있듯이 스위칭주파수를 증가할 경우 전압의 크기는 변화가 없으나, 같은 시간에 발생하는 펄스수가 증가하기때문에 그만큼 전동기 권선에 영향을 줄 확률이 높아진다. 즉, 이것은 스위칭주파수가 높은 전력변환소자의 도입시 전압상승 변화 비율이 펄스가 전동기 권선에는 전달되므로 전동기 권선 절연에 나쁜 요소로 작용한다. 스위칭주파수의 변화는 전동기의 운전음, 노이즈 및 누설전류에 영향을 미친다. 본 실험을 진행하는 동안 스위칭주파수를 권장치보다 낮추어 운전한 경우 전동기의 소음이 점차 증가함을 알 수 있었다.

### 3.3 운전주파수에 따른 영향

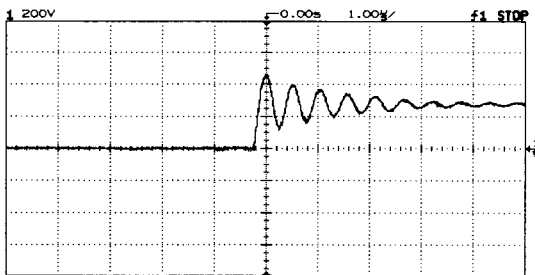
인버터 제어장치는 부하의 속도제어를 통해 전력에너지를 효율적으로 운전하는데 사용된다. 부하의 크기에 따라 인버터로 속도 조절하는 경우에 전동기 단자에 나타나는 스위칭 전압의 크기를 파악하는 것은 전동기 절연에 중요한

해석자료가 될 것이다.

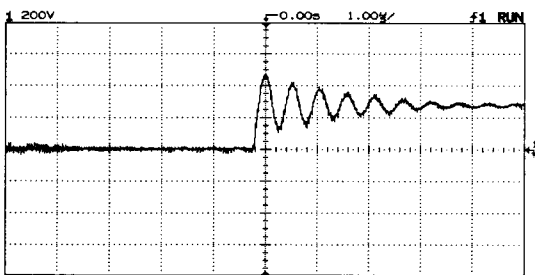
그림 6 은 케이블 길이는 10[m]로 하고, 스위칭 주파수는 12[kHz]로 하였을 경우 운전주파수를 30, 40, 50 및 60 [Hz]로 한 경우 전동기 단자에 나타나는 전압 파형의 측정 결과다.



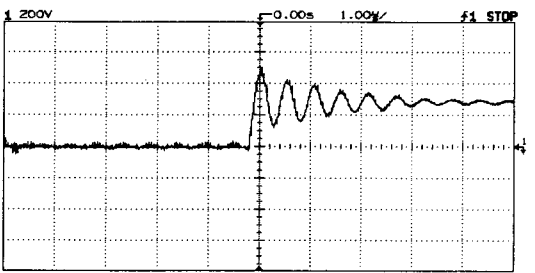
(a) 30[Hz]



(b) 40[Hz]



(c) 50[Hz]



(d) 60[Hz]

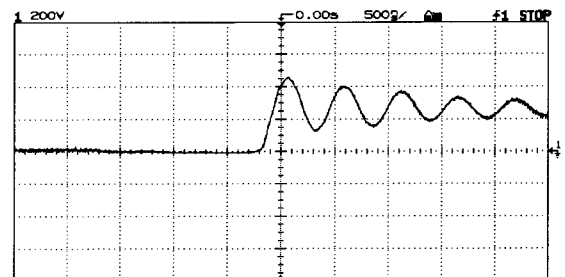
그림 6. 운전주파수에 따른 부하 측 전압 파형  
Fig. 6 Load side voltage due to operating frequency

스위칭 주파수를 고정하고서 운전주파수를 변화시킨 경우에 부하 측 단자에 나타나는 전압의 크기는 변화가 없었다. 따라서 운전주파수의 변화에 대해 전동기의 권선 절연에는 별다른 대책이 필요하지 않음을 확인하였다.

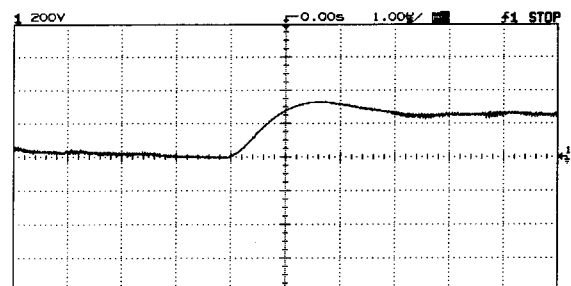
### 3.4 부하측 필터의 사용에 따른 영향

케이블 서지임피던스는 전동기에 비해 매우 낮기 때문에 반사계수가 높아 인버터 스위칭 동작에 의한 급준파의 전파는 전동기 입구단에서의 높은 전압을 발생한다. 가변속드라이브 출력측에 직렬리액터를 설치할 경우 전류 제한장치로 동작하여 급준파 전압의 준도를 완화시키는 작용을 한다.

앞서 측정한 결과에서 인버터의 스위칭주파수나 운전주파수의 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. 우선 그림 7과 같이 스위칭 주파수가 10[kHz]일 때 링잉현상이 매우 크게 작용한 케이블 길이 10[m], 운전주파수는 60[Hz]로 한 경우의 인버터의 출력측 부하단에 필터를 설치전후에 대해 전동기 입구단의 전압 파형을 측정하였다.



(a) no filter

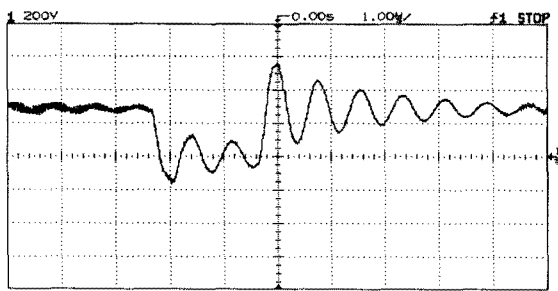


(b) with filter

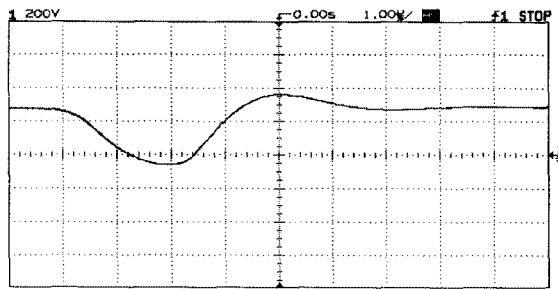
그림 7 필터의 부착에 따라 부하 측 전압 파형  
Fig. 7 Voltage Waveform of Load side due to Filter

그림 7 에서 알 수 있듯이 인버터 출력측에 필터를 부착할 경우 급준파의 서지전압의 급준도는 매우 완화되고, 링잉현상은 거의 해소되는 동시에 전압의 크기도 줄어들을 수 있다.

케이블 길이의 증가시 링잉현상은 줄어들지만, 전압의 크기는 증가하므로 필터의 부착시 전동기 단자 전압크기를 줄이는 것이 매우 중요하다. 다음 그림 8은 스위칭 주파수를 10[kHz]로 고정하고서 케이블 길이를 20[m]로 60[Hz]로 운전하는 경우에 필터의 부착전후에 대해 부하 측 단자의 전압 파형 측정결과를 나타내었다.



(a) no filter



(b) with filter

그림 8 필터의 부착에 따라 부하 측 전압 파형  
Fig. 8 Voltage Waveform of Load side due to Filter

그림 8은 인버터 출력단에 리액터를 설치하고서 3마력 유도전동기를 가변속 운전할 경우 부하측에 나타나는 전압 파형을 필터의 설치전후의 측정결과를 나타낸 것이다.

케이블 길이는 20[m]로 한 경우 필터를 설치하지 않고 인버터로 가변속 운전한 경우 부하측에 나타나는 전압파형은 그림 8(a)와 같이 링잉현상이 높게 나타나지만, 인버터의 출력단에 필터를 설치하고서 측정한 그림 8(b)의 결과에서는 피크전압의 크기가 완화되는 동시에 전압변화비율이 매우 낮아지는 동시에 링잉현상이 거의 사라짐을 알 수 있다. 따라서 전동기 단자에 미치는 오버슈트와 같은 영향이 거의 없으므로 인버터 스위칭에 의한 급준파 전압에 의한 전동기 권선절연 고장의 우려는 없다.

#### 4. 결 론

본 연구는 산업현장에서 전동력에너지를 효율적으로 운영하기 위해 사용되는 PWM 전압형인버터의 스위칭 전압에 대한 영향을 측정 분석한 것이다. 전동기의 원활한 속도제어와 인버터의 효율을 높이기 위해 스위칭주파수가 높은 전력반도체 소자를 사용할 경우 인버터의 출력측에서 발생한 급준한 전압이 케이블을 통해 전동기 단자에 도달할 경우에는 전동기 절연에 큰 영향을 미칠 수 있다.

측정결과 전동기 권선 절연에 영향을 주는 요소로서는 운전주파수에 대해서는 거의 영향이 나타나지 않지만, 스위칭주파수가 높은 경우 링잉현상의 발생확률이 높았으며, 스위칭 주파수의 고정시 케이블 길이가 증가함에 따라 전압의 변화비율보다는 크기에 많은 영향을 받음을 확인하였다. 또한 인버터의 부하 측에 교류 필터를 연결하여 운전할 경우 케이블 길이 증가에 따라 발생한 링잉현상의 제거로 인버터에 의한 전압스트레스 문제가 해소될 수 있음을 확인하였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 김종겸, 이은용, "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
- [6] NEMA, "Application Guide for AC Adjustable Speed Drive Systems"