

## 상용인버터 구동 유도전동기의 마이크로 서지 및 노이즈 억제에 관한 대책

(Countermeasure on the Suppression of Micro Surge and Noise for a Induction Motor  
Driven by Commercial Inverter)

김덕현\* · 최정원\*\*

(Duk-Hyun Kim · Jeong-Won Choi)

### 요 약

일반적으로 산업현장에서 널리 사용되는 유도전동기는 상용인버터를 이용하여 속도제어를 하게 된다. 상용인버터로 구동되는 유도전동기는 인버터의 고속 스위칭에 의한 마이크로 서지전압을 발생한다. 이러한 마이크로 서지는 전동기의 소손뿐 만아니라 PLC 제어계에 있어서 노이즈 문제를 발생하며, 생산 활동에 막대한 지장을 초래하게 된다. 본 논문에서는 마이크로 서지의 발생 메커니즘을 살펴본 후 전동기 소손 방지를 위한 대책을 제시하고 인버터 출력단에 LCR 필터를 부착하여 실험하였으며 결과로 마이크로 서지전압이 저감됨을 확인하였다. 또한 PLC 제어계의 노이즈 억제에 대해 이론적 고찰을 통해 대책도 제시하였다.

### Abstract

Generally, speed control for Induction motor widely used in industrial field is accomplished by commercial inverter. Induction motor driven by commercial inverter causes the micro surge voltage because of high speed switching of inverter. Micro surge brings about not only the breakdown of motor but also noise in PLC control system. And they court the enormous interference in activity for production. In this paper, we suggest the suppressible countermeasure for the breakdown of motor after the consideration of productive mechanism about micro surge. Experiment is performed by inverter with LCR filter in its output terminal. As a result, we confirmed that micro surge voltage is reduced. And the suppressible countermeasure for the noise of PLC control system is suggested by theoretical consideration.

Key Words : Commercial Inverter, Micro Surge, PLC

---

\* 주저자 : 건국대학교 전기공학과 교수  
\*\* 교신저자 : 금오공과대학 전자공학부 교수  
Tel : 054-478-7895, Fax : 054-478-7449  
E-mail : jwchoi@kumoh.ac.kr  
접수일자 : 2008년 9월 11일  
1차심사 : 2008년 9월 24일  
심사완료 : 2008년 10월 2일

## 1. 서론

서지문제라고 하면 전력계통의 서지나 개폐 서지의 이미지가 강했으나 지금은 전원선으로부터 침입해 오는 서지나 스위칭 전원으로부터 발생하는 서지, 정전기 방전에 의한 서지, 디지털 신호 그 자체가 배선이나 전원선에 유도되어 발생하는 서지 등 여러 가지 종류로 다양하다[1].

산업설비의 중요 구동원인 유도전동기는 일반적으로 속도제어를 위해 PWM(Pulse Width Modulation) 방식의 상용인버터를 사용하고 있다. 인버터로 전동기를 구동하는 경우, 인버터 스위칭 소자의 고속 스위칭에 의해 발생하는 서지전압이 인버터 출력전압에 중첩되어 전동기의 입력 단자전압이 인버터 출력전압보다 높게 되는데, 이러한 현상을 마이크로 서지(Micro Surge)라 한다. 이러한 마이크로 서지전압은 절연열화에 의하여 유도전동기의 각 권선 간의 절연파괴를 발생시키며, PLC 제어계통에서 기기의 오동작, 통신장애 등을 유발시키는 노이즈 문제를 야기한다[1-4].

본 논문에서는 상용인버터 구동 유도전동기의 절연내력을 넘어서는 마이크로 서지전압의 발생 메커니즘과 이로 인한 전동기 및 PLC 제어시스템에 미치는 영향을 파악하였으며 그 대책을 제시하였다. 제시된 대책 중, 전동기 소손 방지와 마이크로 서지전압으로 인한 노이즈 억제 효과를 동시에 얻을 수 있는 방법으로 인버터 출력단에 LCR 필터를 취부하여 실험을 하였으며 결과로 마이크로 서지전압을 억제할 수 있음을 확인하였다. 또한 PLC 제어계통에 영향을 미치는 노이즈 발생에 대해 이론적 고찰을 통해 억제할 수 있는 방법을 제시하였다.

## 2. 마이크로 서지의 발생원인

인버터의 주회로는 상용전원을 직류로 변환하여 맥동분을 평활하는 컨버터부와 3상 브리지로 구성된 트랜지스터의 스위칭에 의해 직류를 가변주파수의 교류로 변환하는 인버터부로 구성된다. 인버터는 통상적으로 PWM 제어를 채용하고 있는데 이것은 인버터부의 트랜지스터를 제어하여 출력 1 cycle 중 복

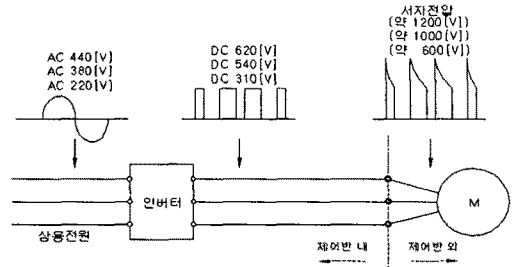


그림 1. 전압파형  
Fig. 1. Waveform of voltage

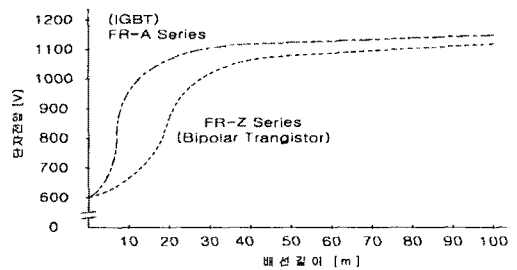


그림 2. 배선길이의 단자전압  
Fig. 2. Wiring length and terminal voltage

수의 스위칭 펄스를 발생시키고, 그 펄스폭을 변화시킴으로써 출력주파수와 출력전압을 제어하는 방식이다. 유도전동기의 제어특성을 향상시키기 위하여 빠른 스위칭 소자를 필요로 하는데, 주회로 소자로는 power Tr과 IGBT를 사용하고 있으며 최근에는 스위칭 속도가 power Tr보다 10배 정도 빠른 IGBT를 주로 사용하여 제품화가 이루어지고 있다. 이러한 스위칭 소자의 1초 동안 발생하는 스위칭 펄스 수, 즉 carrier 주파수는 통상 0.7~15[kHz]로 높기 때문에 제어특성은 향상되었으나 마이크로서지전압의 영향으로 전동기 소손의 발생빈도가 높아지며 노이즈 문제가 발생하고 있다. 인버터는 상용전원을 직류로 정류해서 스위칭에 의한 출력전압을 제어하므로 출력전압의 피크값은 통상적으로 정류한 직류전압(상용 전원전압 실효치의  $\sqrt{2}$  배) 이하로 나타난다. 그러나 스위칭에 의해 인버터와 전동기 사이 배선의 인덕턴스(L)와 배선간의 표유용량(C)에 의해 LC 공진으로 발생한 서지전압이 인버터 출력전압에 중첩되어 나타나게 되고, 그 결과 그림 1과 같이 인버터의 출력전압 피크값에 비해 전동기 입력

단자전압의 피크값이 높아지는 현상, 즉 마이크로 서지현상이 발생한다. 전동기의 입력 단자전압 피크값은 최대 회로전압인 인버터의 출력전압 피크값의 약 2배 또는 스위칭 조건에 따라 3~4배에 이르는 큰 값이 된다. 이러한 마이크로 서지현상은 스위칭속도와 배선의 길이에 따라 발생하는 전압의 크기는 달라질 수 있지만 PWM 방식의 인버터 사용에 있어서는 피할 수 없는 현상이다[2-4].

그림 2는 400[V]급 인버터와 전동기간의 배선길이와 전동기 입력 단자전압의 관계의 예를 나타낸 것이다. 전동기의 입력 단자전압은 배선의 길이가 길어짐에 따라 상승하고 인버터의 출력전압이 약 2배인 지점에서 포화됨을 알 수 있다. IGBT FR-A 시리즈와 바이폴라 트랜지스터 FR-Z 시리즈 모두에서 포화되는 전압이 거의 같은 값을 가지는 것도 확인할 수 있다. IGBT를 이용한 FR-A 시리즈와 같은 저소음 인버터는 스위칭 속도가 빠르므로 FR-Z 시리즈 등의 비저소음 인버터에 비해 전동기의 단자전압이 높게 나타난다[4].

### 3. 마이크로 서지의 발생 메커니즘과 영향

#### 3.1 발생 메커니즘

전동기의 절연물은 대체로 열, 진동, 오손 및 흡습에 의해 경연열화가 진행된다. 또한 이외에도 전동기를 400[V]급 인버터로 운전하는 경우, 인버터와 전동기간의 배선이 길면 전동기의 절연내력을 초과하는 마이크로 서지전압이 더해져 파손이 초래된다. 전동기의 권선에 일정 이상의 전압이 인가되면 절연물을 넣어 접합한 고전압부분과 저전압부분 사이에 존재하는 미소공간에 corona 방전이 발생한다. 이 corona 방전은 전계가 집중하는 곳에서 발생하는데 마이크로 서지에 의한 절연열화가 문제를 일으키는 경우는 그림 3과 같이 권선간의 미소공간에서 발생하는 외부 corona와 절연물 내의 잔류기포(void)와 같은 미소공간에서 발생하는 내부 corona가 있다. Corona 방전이 발생하면, 방전 외부에서 이온이 방출되고 전계 사이에 가속되어 절연재료의 분자구조

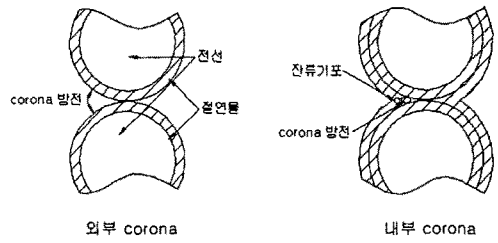


그림 3. Corona 방전  
Fig. 3. Corona discharge

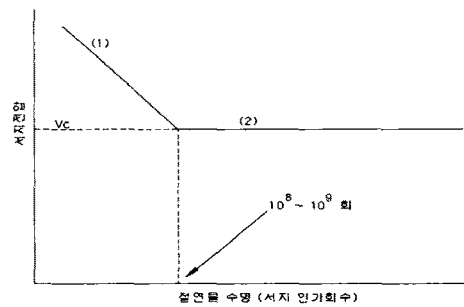


그림 4. 서지전압과 절연물 수명  
Fig. 4. Surge voltage and insulator lifetime

에 충돌하여 변질, 붕괴시키거나 방전으로 변질된 절연물 표면 미소부분의 온도가 상승하고 화학분해와 열적 용해가 발생한다. 또한 corona 방전에 의해 O, O3, NO, NO3가 발생하여 절연물 사이 유기화합물과 반응하여 변질되는 세 가지 침식현상이 복합적으로 작용하여 절연체의 침식이 발생하고, 침식부분이 발전하여 국부파손을 초래하며 이것이 다시 수지상(나뭇가지 모양으로 계속 번짐)으로 성장하여 결국 파손에 이르게 된다. Corona 방전은 corona 개시전압 이상의 서지전압이 인가되어 발생한다. Corona 개시전압은 고전압부분과 저전압부분의 형상, 거리, 절연두께, 정전용량, 미소공간의 크기 및 인가전압의 형상 등에 따라 다르다. 열, 진동, 오손 및 흡습 등에 의한 열화를 제외한 서지전압의 크기와 절연물의 수명(서지 인가회수)의 관계는 그림 4의 (1) 부분과 같이 전압이 높으면 수명이 짧고, 전압이 낮으면 수명이 길다. 또한 (2) 부분에서와 같이 corona 개시전압 ( $V_c$ ) 이하에서는 corona 방전이 발생하기 어렵고 거의 수평의 절연물 수명을 가진다. (1)부분과 (2)부분의 굴절점은 통상적으로 서지전압의 인가회수가  $10^8$

~10<sup>9</sup>회 정도이기 때문에 서지전압의 인가회수가 이 미 이 이상에 도달한 전동기는 corona 방전에 의한 절연열화가 발생하지 않으리라는 사실을 알 수 있다. 10<sup>9</sup>회의 인가회수는 carrier 주파수를 1[kHz], 1일 운전시간을 10[hr]로 하는 경우 약 3개월 정도의 운전 기간으로 볼 수 있다. 따라서 일반적인 사용 상태에서 마이크로 서지전압에 의한 절연열화 및 소손은 약 3개월 이내에 발생하고 그 이후에는 발생할 확률이 낮다는 것을 예측할 수 있다[2-4].

### 3.2 전동기에 미치는 영향

인버터의 출력전압에 배선의 LC공진으로 인해 발생한 마이크로 서지전압이 중첩되고 이 전압이 전동기의 절연내력을 초과하면 전동기 절연이 열화되어 소손된다. 전동기 입력전압 기준에 대해서 NEMA standard MG1에서는 가변주파수 제어를 사용하는 정격 600[V] 이하 일반전동기의 경우 V<sub>peak</sub>는 1,000[V], 전압상승시간은 2[μs]로 규정하고 있다. 또한 일본전기공업회 적용지침에는 850[V]를 초과하면 전동기 절연이 열화되어 소손되는 것으로 보고 있다. 전동기 입력전압 즉, 마이크로 서지전압은 전압 상승시간에 따라 전동기 권선 내에서의 분포가 달라지는데 전압상승이 느린 경우(약 5~10[μs])는 입력전압이 권선 간에 고르게 분포되지만, 전압 상승이 빠른 경우(약 0.5[μs] 이하)에는 대부분이 전원측 제1코일에 집중되기 때문에 이 부분의 절연열화가 심화된다. 실제로 전동기 파손의 37[%] 정도가 전원측 제1코일의 절연파괴에 기인한다는 통계가 보고되고 있다.

산업현장에서 생산라인의 구성 시, 인버터가 장착되는 제어반과 전동기간 거리는 최대 약 100~150[m] 정도이다. 200[V]급 유도전동기의 경우 직류 전압이 약 300[V]로 낮기 때문에 마이크로 서지전압이 중첩되어 전동기 입력 단자전압이 인버터 출력전압의 2배로 되어도 전동기 소손의 예는 드물다. 그러나 400[V]급의 경우에는 전동기 입력 단자전압이 인버터 출력전압의 2배가 되면 절연내력을 넘어서게 되므로 전압 스트레스에 의해 절연파괴를 가져오게 된다. 400[V]급의 경우 스위칭 소자로 IGBT를 사용

하는 경우 전압상승시간이 0.5[μs]일 때 2배의 전압 상승이 일어나는 배선길이는 40[m] 정도이다. 이상에서 살펴본 바와 같이 절연파괴로 인한 전동기 소손은 주로 400[V]급 전동기에서 가동 초기에 그리고 인버터와의 배선길이가 40[m] 이상에서 발생하게 되므로 이와 같은 경우에는 전동기 보호 대책이 반드시 필요하다[5].

### 3.3 PLC 제어계통에 미치는 영향

산업현장의 생산설비는 대부분 PLC를 이용하여 제어하고 있으며, PLC는 반도체로 구성되어 있어 외부에서 발생하는 노이즈에 취약하다.

산업설비의 구동원으로 많이 사용하고 있는 삼상유도전동기의 속도제어를 위해 상용 인버터를 사용하는 경우, 인버터의 스위칭 소자의 고속 스위칭에 의해 인버터 케이블이나 전동기와 대지간의 표유용량(C)에 의해 식 (1)과 같은 노이즈 전류(I<sub>n</sub>)가 발생한다.

$$I_n = C \cdot \frac{dv}{dt} [A] \quad (1)$$

이 노이즈 전류는 스위칭 소자의 on/off 시에 발생하므로 carrier 주파수와도 관계가 있다. 이 경우 carrier 주파수를 낮추면 노이즈 발생 빈도를 낮게 하는 효과는 있지만 노이즈나 마이크로서지 전압의 크기는 저감되지는 않는다. 이러한 노이즈 전류가 발생하면 신호선이나 전원선을 통하여 전파되는 전도 노이즈, 전자유도나 정전유도 등으로 전파되는 유도 노이즈, 전자파 형태로 공중으로 전파되는 방사 노이즈 등으로 인하여 기기의 정상적인 상태를 방해하는 전자파 장애(Electromagnetic Interference, EMI)가 발생하여 산업현장의 PC, PLC, 감지장치 및 계장품 등의 오동작을 초래하게 되므로 이에 대한 대책이 필요하다[6].

## 4. 마이크로 서지에 대한 대책

### 4.1 전동기에 대한 대책

마이크로 서지전압의 영향으로 인한 절연파괴로

부터 전동기 소손을 방지하기 위한 방법은 다음과 같다.

첫째, 전동기의 절연을 강화하는 방법으로 400[V]급 인버터 구동용 절연강화 전동기를 사용하거나, 정토크 또는 저진동 전동기와 같은 전용 전동기는 인버터 구동 전용 전동기를 사용한다.

둘째, 인버터 출력측에 마이크로 서지전압 억제 필터를 부착하여 전동기 단자전압 피크치를 허용 단자전압 이하로 억제하는 방법이다. 이러한 필터는 현재 상용화되어 있으며 적절한 것을 선택하여 부착하거나 인버터 제조업체에 따라 지정사항으로 선택 구매하여 부착하여도 된다. 그림 5는 마이크로 서지전압 억제를 위한 LCR 필터의 적용 예를 나타낸 것이다. L은 인버터 출력부에 직렬로 CR은 병렬로 부착하여 마이크로 서지 전류에 의한  $V_r = L(di/dt)$ 를 리액터에 유기시켜 서지전류 변화를 작게 하고  $I_c = C(dv/dt)$ 를 커패시터에 흘려 PWM 파형의 기울기를 작게 하여 마이크로 서지전압의 주파수와 크기를 낮춘다.

셋째, 전동기 입력단에 병렬로 RC 스너버를 부착하는 방법으로 인버터 출력파형의  $dv/dt$ 를 작게 하여 전동기 입력 단자전압이 corona 개시전압 이하가 되도록 하여 마이크로 서지전압을 억제한다. 그러나  $di/dt$ 는 제어하지 않으므로 서지전류는 변화가 없다.

#### 4.2 실험결과

인버터의 고속 스위칭에 의한 마이크로 서지전압 발생과 억제에 대해 그림 6과 같은 실험장치를 통하여 실험을 하였으며, 사용된 장치의 사양은 표 1과 같다. 실험을 위한 배선의 길이는 20[m]씩 증가시켜 100[m]까지로 하여 마이크로 서지전압의 크기를 파악하였으며, 배선길이 100[m]에 대하여 LCR 필터 부착후의 크기를 측정하여 비교하였다 (200[V/div]).

그림 7은 인버터 출력단 전압으로 피크값은 약 275[V] 정도이며 전원전압 AC 220[V]의  $\sqrt{2}$  배 이하로 나타나고 있으며, 배선의 LC 공진에 대한 영향은 없으므로 마이크로 서지전압이 발생하지 않고 있다.

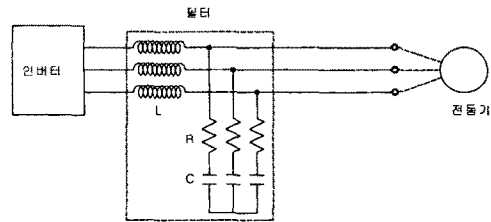


그림 5. LCR 필터 결선도  
Fig. 5. LCR filter connection diagram

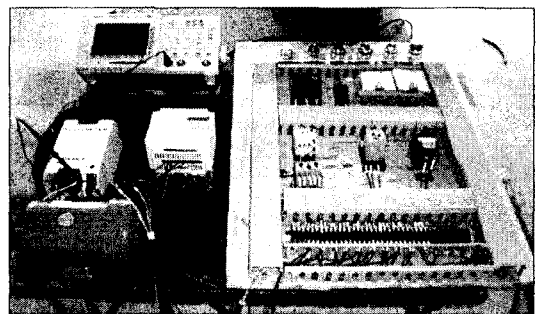


그림 6. 실험장치  
Fig. 6. Experimental equipments

표 1. 실험장치 사양  
Table 1. Specification of experimental equipments

명칭	사 양	비고
인버터	LG iG5 시리즈(200[V]급)	
스위칭소자	Tyco P085A2001	
전동기	3상 60[Hz] 220[V] 0.2[kW]	
오실로스코프	TDS 3012	
LCR 필터	IT MSF480	

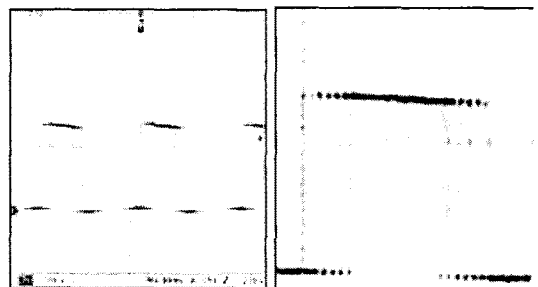


그림 7. 인버터 출력단 전압파형  
Fig. 7. Voltage waveform of inverter output terminal

## 상용인버터 구동 유도전동기의 마이크로 서지 및 노이즈 억제에 관한 대책

그림 8에서 배선길이 20[m]의 경우 서지전압의 최대 피크값은 약 420[V], 40[m]의 경우 약 470[V], 60[m]의 경우 약 480[V], 80[m]의 경우 약 490[V], 100[m]의 경우 약 500[V] 정도로 나타나고 있다. 배선의 길이가 길어짐에 따라 LC 공진으로 인한 마이크로 서지전압의 크기가 커지며 발생 빈도수도 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한 배선길이 100[m]에 대해 LCR 필터를 부착한 경우의 마이크로 서지전압은 약 360[V] 정도로 억제되어 고르게 발생하고 있으며 그 크기는 필터부착 전에 비하여 28[%] 감소하였다. 또한, carrier 주파수가 일정하므로 마이크로 서지전

압 발생 빈도수는 차이가 없음을 알 수 있다.

### 4.3 PLC 제어계통에 대한 대책

PLC는 노이즈에 민감한 전자부품으로 구성된 제어 유닛으로 메이커별 사용 매뉴얼을 참고하여 설계, 제작하게 된다[7,8]. 그림 9에서와 같이 전원선으로부터의 전도 노이즈를 방지하기 위하여 제어용 변압기의 중성선을 접지하며 NCT(Noise Cut Transformer)나 노이즈 필터를 통하여 PLC power supply로 전원을 공급한다. 또한 노이즈 필터로부터 power

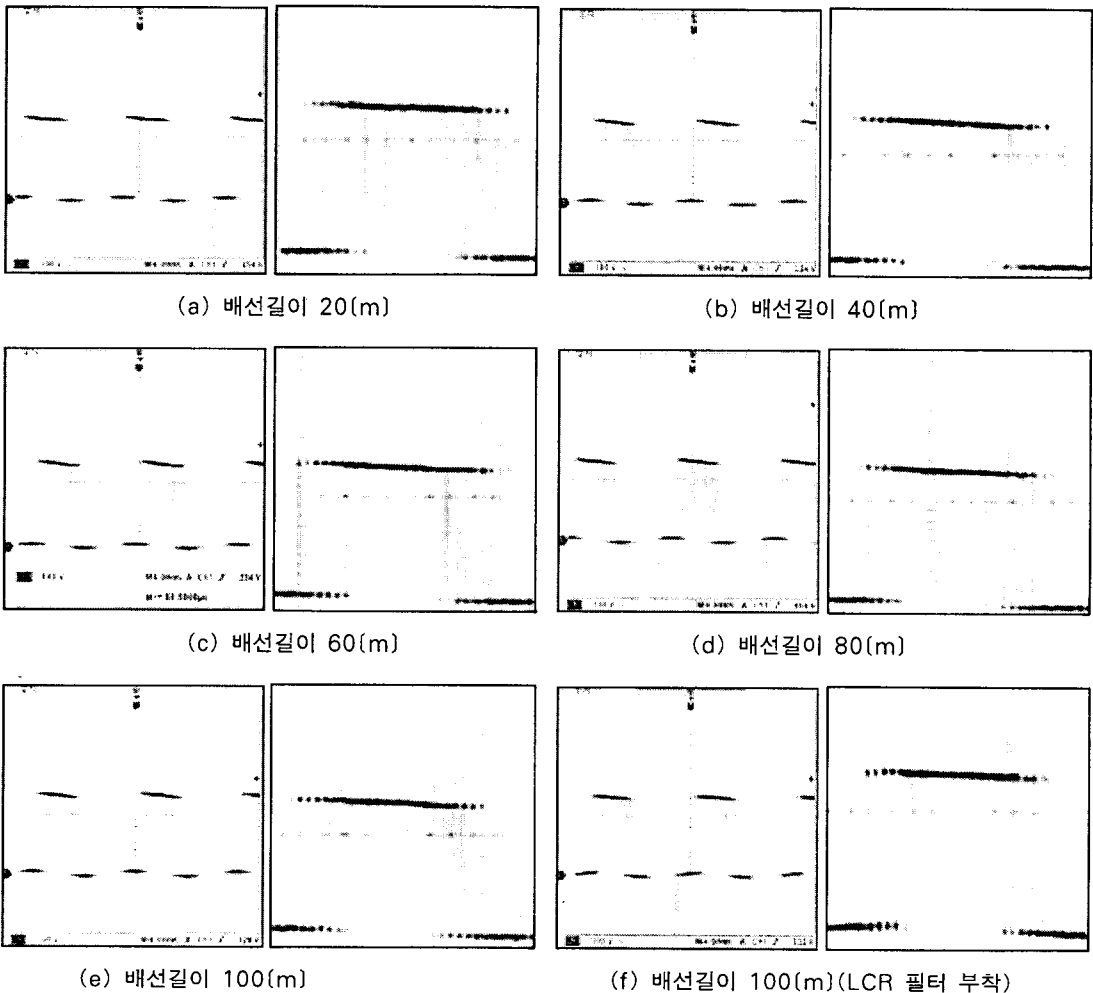


그림 8. 배선길이에 따른 전동기 입력단자전압

Fig. 8. Motor input terminal voltage according to cable length

supply까지의 선로는 twist pair cable을 사용한다. 실제로 노이즈의 발생원은 다양하며 이에 대한 억제 대책을 원인별로 마련하기란 어렵다. 인버터의 마이크로 서지현상에 의한 노이즈는 4.2 실험결과에서 보듯이 인버터 출력단에 마이크로 서지필터를 사용하면 전동기 보호뿐만 아니라 이로 인한 노이즈의 세기를 저감시켜 억제할 수 있다. 이외에 노이즈를 억제하기 위해서는 기본적으로 규정에 따라 접지를 실시하여야 하며, 제어선과 동력선은 분리 배선하여야 하고 제어선은 차폐선(Shield Cable)을 사용하면 좋다. 현장에서의 선로는 덕트 내에 배치되며 이때 동력선과 제어선은 차폐막에 의해 분리되므로 유도 및 방사 노이즈는 이것에 의해 일차적으로 억제된다. 특히 PLC와 PLC, PLC와 PC 등의 통신 케이블은 반드시 차폐선을 사용하여 별도의 배관으로 설치하는 것이 좋다. 이외 산업현장에서 자주 발생하고 있는 위치검출기, PLC 프로그램 및 계장품 및 센서 등의 오작동은 인버터와 전동기 배선으로부터 신호선에 유도되는 노이즈에 직접 영향을 받으므로 규정접지 및 선로분리 외에 인버터 입, 출력단에 LC 필터, 용량성 필터를 설치하여 저감시켜야 한다.

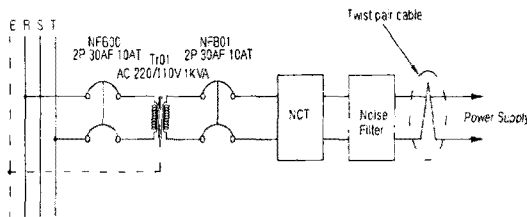


그림 9. PLC 전원계통도  
Fig. 9. PLC power system diagram

## 5. 결 론

본 논문은 마이크로 서지현상으로 인한 전동기 소손 및 PLC 제어계통에서의 노이즈 억제에 관하여 다루었다. 일반적으로 절연강화 전동기를 사용하는 것은 전동기만을 보호하는 것으로 제어계통에 대한 노이즈의 억제는 실효성이 없다. 또한 전동기 입력단에 RC 스너버를 부착하는 경우도 마이크로 서지 전압의 억제효과는 있지만 노이즈 억제 측면에서는 불리하다. 따라서, 전동기 소손 방지와 노이즈 발생

억제를 동시에 고려하기 위해서는 인버터 출력단에 LCR필터를 부착하는 것이 가장 좋은 방법이다. 실험결과로 배선길이를 100[m]로 한 경우 LCR 필터 취부 후 마이크로 서지전압이 28[%] 정도 억제됨과  $dv/dt$ 의 크기가 감소하여 서지전류도 동시에 억제됨을 알 수 있다.

가전분야에서 운송분야에 이르기까지 폭 넓게 사용되고 있는 상용인버터는 경박단소화에 따라 고속의 스위칭 소자를 사용하게 되었으며, 그로 인한 전동기 및 제어계통의 악영향으로 산업현장에 많은 폐해가 발생하고 있다. 본 논문에서의 제시한 방법들이 산업현장의 이러한 폐해를 감소시키는데 좋은 자료로 사용되리라 판단된다.

## References

- (1) 東北學院大學嶺岸茂樹, "서지에 의한 전자기기의 전자 간섭과 그 대책".
- (2) 최기수 외 2인, "인버터 구동시 전동기 입력전압 서지 분석 및 대책", 전력전자학회지, pp. 23~32. 2001. 12.
- (3) 지옥조, "마이크로서지 대책", 전력전자학회지, pp. 33~40. 2001. 12.
- (4) MITSUBISHI, "범용 INVERTER TECHNICAL NOTE".
- (5) 일본전기공업회기술자료 제169호 "일반용 저압3상 유도 전동기를 인버터 구동하는 경우의 적용지침".
- (6) 대한전기학회, "기술조사보고 제12호 전동기 제어를 위한 인버터 기술", pp. 128~133, 1998. 9.
- (7) GOLDSEC M Series 매뉴얼, LG산전.
- (8) GLOFA GM Series 매뉴얼, LG산전.

## ◇ 저자소개 ◇

### 김덕현 (金德顯)

1966년 7월 10일생. 1992년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1996년 창원대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991~1996년 (주)한화기계 자동화사업부. 1997년~현재 건동대학교 전기공학과 교수.

### 최정원 (崔正元)

1971년 5월 6일생. 1995년 영남대학교 전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2003~2006년 (주)STX중공업연구소 과장. 현재 금오공과대학교 전자공학부 교수.