

# 마이크로 서지(Micro Surge) 대책

지 옥 조  
((주)오키 대표이사)

## 1. Micro surge란 ?

Inverter로 Motor를 구동할 때 Inverter의 Switching에 의하여 발생한 Surge전압이 Inverter의 출력전압에 중첩되므로 Motor의 단자 전압이 Inverter의 출력 전압보다 높게되는 현상을 말한다.

### 1.1 Inverter의 동작원리

#### 1.1.1 Inverter의 기본회로 구성

Inverter의 기본회로는 사용전원을 정류하여 직류로 바꾼 다음 맥동분을 평활하는 Capacitor부와, 3상 브릿지로 구성된 Transistor(IGBT)의 Switching에 의해 직류를 교류로 변환시키는 Inverter부로 구성된다.

#### 1.1.2 Inverter의 제어방식

범용 Inverter는 일반적으로 PWM 제어방식을 채용하고 있다.

PWM 제어라고 하는 것은 Inverter부의 Transistor를 제어하는 방식으로 출력 1 Cycle 중에 복수회의 Switching Pulse를 발생시키고 그 Pulse폭을 변화시킴으로써 출력 주파수 및 전압을 제어하는 방식이다.

1초 동안에 발생시키는 Switching Pulse의 수를 Carrier Frequency라고 한다. Carrier Frequency는 보통 0.7~15KHz로 높은 주파수이므로 Inverter부의 소자로는 고속 Switching이 가능한 Transistor(IGBT 따위)를 채용하고 있다.

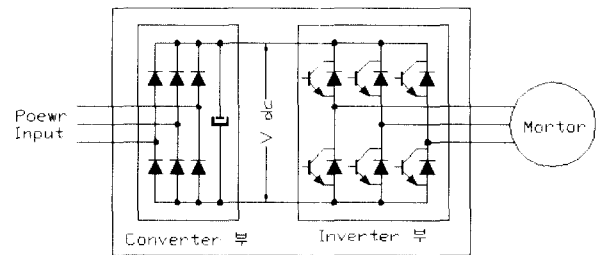


그림 1 Inverter의 구성

### 1.2 Micro surge의 발생 Mechanism

Inverter는 상용전원을 일단 직류로 정류하고, Switching에 의하여 출력을 제어하므로 출력전압의 최대치는 정류한 직류전압의 최대치(상용전원 실효치의 약  $\sqrt{2}$  배 : AC440V의 경우 DC620V) 이하가 된다.

Switching으로 인하여, Inverter와 Motor간의 배선의 Indutance(L성분)와 배선간의 부유용량(C성분)의 값에 따라서는 LC 공진으로 발생한 Surge전압이 Inverter의 출력전압에 중첩되어진다. 그 결과 그림 2와 같이 Inverter 출력전압의 최대값에 비하여 Motor입력단자의 전압의 최대값이 높게 되는 현상(Micro surge)이 발생한다. 이 경우 Motor의 입력단자전압의 최대값은 최대 회로전압(Inverter 출력전압의 최대값)의 2~2.5배(≒1200V~1600V)에 달한다.

즉, Micro surge는 Switching속도와 배선길이에 따라서 발생전압이 다르게 되지만, 그 원리에 있어서 특히 PWM방식의 Inverter에 있어서는 피할 수 없는 현상이다.

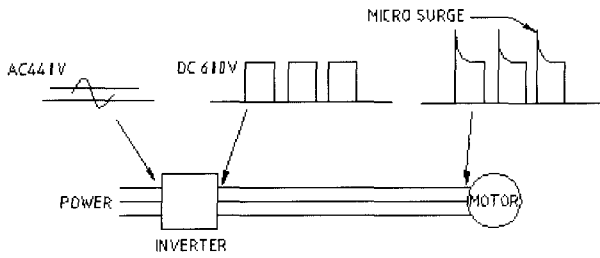
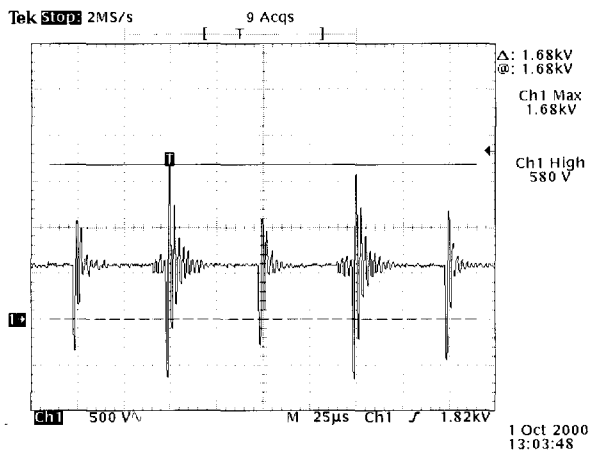
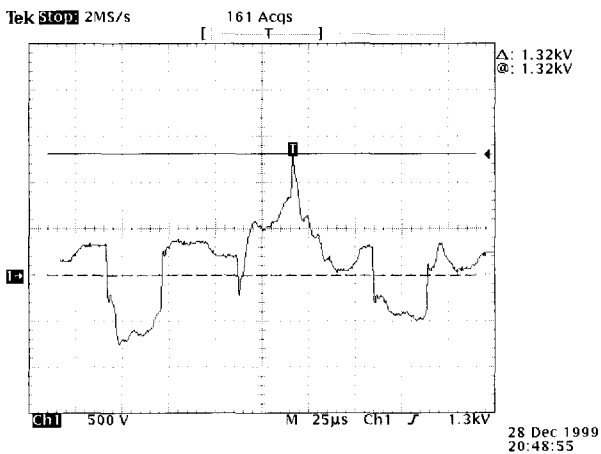


그림 2 각 부분별 전압 파형



Motor 입력단의 상과 상 사이의 Microsurge 파형 (DC link 620V)



Motor 입력단의 상과 접지 사이의 Microsurge 파형 (DC link 620V)

## 2. Micro surge의 영향

상기의 Micro surge는 주로 Motor에 영향을 준다. 그 구체적인 내용에 대해서 설명한다.

### 2.1 Motor Surge의 영향

배선의 LC공진으로 인하여 발생한 Micro surge전압이 Inverter의 출력에 중첩하여, 이 전압이 Motor(Geared Motor도 포함한다.)의 CIV(Corona Inception Voltage)를 초과하면 Motor의 절연이 열화하여 파손될 수가 있다. 상기의 Micro surge전압은 Motor의 권선에 균일하게 분포되지 않고 전원측의 제 1 Coil에 집중적으로 걸리기 때문에 이 부분이 절연열화가 집중적으로 일어난다.(절연열화의 자세한 내용은 2.2항 참조)

### 2.2 Surge 전압에 의한 Motor의 절연열화

Motor의 절연물은 일반적으로 “열, 진동, 오손, 흡습” 등으로 인해 경년 열화가 진행되고 있다.

이들 요인 외에, Motor를 400V급의 Inverter로 운전하고 Inverter와 Motor사이의 배선 길이가 긴 경우에는 Motor의 절연 내력을 넘는 Micro surge전압이 가하여져 파손에 이르는 경우가 있다. 이 Micro surge전압에 의한 Motor의 절연 열화 메카니즘에 관해서 설명한다.

#### 2.2.1 현상과 Mechanism

Motor의 권선에 어떤 전압이상의 높은 전압이 인가되면 절연물을 매개로 하여 집합한 고전압 부분과 저전압 부분의 사이에 존재하는 미소 공간에 국부방전(Partial Discharge)이라 불리는 Corona 방전이 발생한다. 이 Corona 방전은 Energy가 집중하는 곳에서 발생하며, 권선과 권선간의 미소 공간에서 발생하는 외부 Corona(그림 3)와 절연물 내의 잔류기포등의 미소 공간에서 발생하는 내부 Corona(그림 4)가 있다.

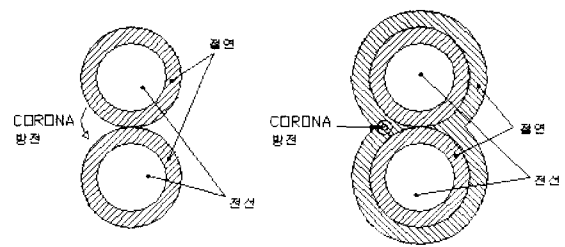


그림 3 외부 Corona

그림 4 내부 Corona

이들 Corona 방전이 발생하면 다음과 같이 절연 재료의 침식과 열화가 진행하여 파손되게 된다.

열화의 진행 : 다음의 3종류의 침식 현상이 복합적으로 진행하여 열화에 도달한다.

- a. 침식 ① Corona 방전 부분으로부터 Ion이 방출되고 전 계층에 가속되어 절연 재료의 분자구조에 충돌하여 변질, 붕괴된다.
- ② Corona방전에 노출된 절연물의 표면의 미소 부분의 온도가 상승하여 화학 분해와 열적 용해가 발생한다.
- ③ Corona 방전에 의해 O, O<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>가 발생하여 절연물 중의 유기 화합물과 반응하여 변질된다.
- b. 열화 ① 침식된 부분이 발전하여 국부 파괴를 일으키고, 이것이 여러 개가 겹쳐 나뭇가지 모양으로 발생하여 전체적인 파괴에 이른다.

2.2.2 Corona 방전의 발생과 절연수명

Corona 방전은 두점 사이에 Corona 전압 이상의 Surge전압이 인가되면 발생하고 전 항의 절연열화가 진행된다. (Corona 개시전압은 고전압부분과 저전압부분의 형상, 거리, 절연재료의 두께, 정전용량, 미소공간의 크기, 인가전압의 파형(상승, 하강시간의 빠르기) 등에 따라 달라진다.)

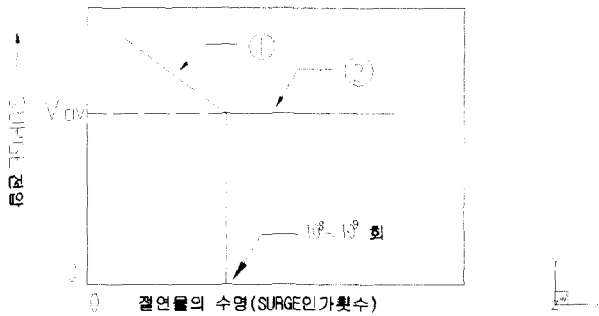


그림 5 절연물의 수명 (Micro Surge 인가 횟수)

그러나, Corona 개시전압이하의 Surge 전압에서는 Corona 방전은 발생하지 않으므로 전항의 절연열화는 진행되지 않는다. 이 Surge전압의 크기와 절연물의 수명(Surge의 인가횟수)의 관계를 나타내면 그림 5과 같이 전압이 높을수록 수명은 짧고 전압이 낮을수록 수명은 길어진다.(①부분)

또 Corona 개시전압(V<sub>CR</sub>) 이하에서는 Corona 방전이 일어나기 어렵기 때문에 거의 수평의 수명선이 되고(②부분) 이 범위에서는 Corona 방전에 의한 절연열화는 거의 일어나지 않는다. ( 단, 열, 진동, 오손 및 흡습 등에 의한 열화는 제외)

①부분과 ②부분의 굴절점은 기존의 DATA로부터 통상 Surge 횟수가 10E8 ~10E9회 정도이므로 Surge의 인가 횟

수가 이미 이 이상 달한 Motor는 일반적으로 이후에도 Corona 방전에 의한 절연 열화는 발생하지 않을 것이라고 예상할 수 있다.

단, Inverter 출력선의 길이나 출력파형의 dv/dt 에 따라 Micro surge 전압의 크기 및 에너지가 다르므로 Inverter와 Motor의 사용환경과 출력파형에 따라 10E9회보다 많아질 수도, 적어질 수도 있다.

《 NOTE 》

1. 단, 그림 5는 열, 진동, 오손 및 흡습 등에 의한 열화는 고려하지 않았다.

2. 
$$\frac{1 \cdot 10E8 \cdot 3.6 \cdot 10E3 \cdot 10 \cdot 10E2}{(\text{Carrier}[\text{Hz}]) (\text{Sec./Hr.}) (\text{Hr./Day}) (\text{Day}) (\text{Pulse 숫자})} = 3.6 \cdot 10E9$$

이므로 인가횟수 10E9는 보통 수 개월의 운전이라고 볼 수 있다.

이상의 내용으로 미루어 볼 때, 결론적으로 통상의 사용상태에서는 일반적으로 절연열화(소손)는 수개월 이내에 발생하고, 그 이후에 발생할 확률은 낮다고 예상된다.

3. Micro surge 대책

3.1 Motor(Geared Motor포함)의 Micro surge에 의한 절연 열화의 대책

3.1.1 Motor의 절연을 강화시키는 방법

Motor를 Inverter로 구동 할 때에는 절연을 강화시킨 Motor를 사용한다.

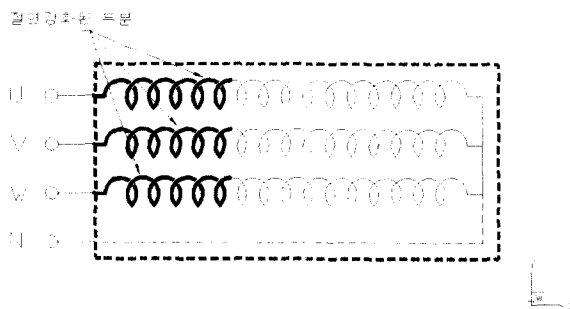


그림 6 절연강화 Motor의 개념도

3.1.2 Motor의 입력 단자 측에서 RC Filter로 Mlicro surge 전압을 억제하는 방법

Micro surge 전압의 크기는 Motor의 입력단자에서 최대가 되며 이 전압이 Motor를 파손시키는 직접적인 원인이 되므로 Motor의 입력단자 전압이 CIV 이하가 되도록 Filter를 설치하여 억제한다.

아래 그림 7과 그림 8은 적용례를 나타낸다.

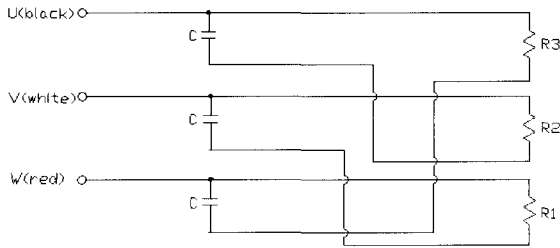


그림 7 RC Filter 회로 개념도

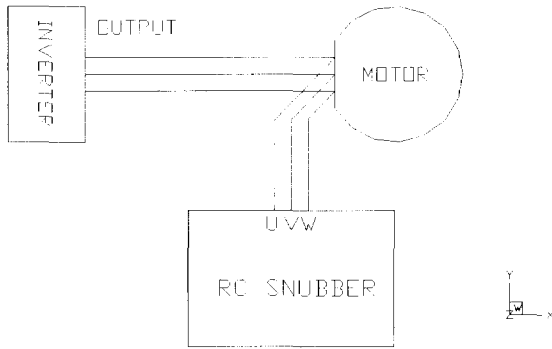


그림 8 RC Filter 설치 개념도

### 3.1.3 Inverter 출력측에 LCR Filter를 적용하는 방법

Inverter의 2차 측에 LCR Filter를 채용하여 Inverter 출력파형의 dv/dt를 작게 함으로서 Motor의 단자 전압이 CIV 이하가 되도록 Micro surge 전압을 억제한다.

이때, Reactor는 Inverter의 전압 전류정격 및 스위칭 주파수 등을 고려하여 설계한다. 특히 출력선의 길이에 따른 분포 용량과 Inductance의 변화 및 출력 파형의 상승 및 하강시간 등은 설계요소로서 매우 중요하다.

Inverter의 출력부에 Reactor를 직렬로 설치하여 Inverter 출력파형의 Micro surge 전류의 변화로 인한  $V_r = L di/dt$  전압을 Reactor에 유기시켜 Surge 전류의 변화가 작아지도록 유도하고, Capacitor를 병렬로 설치하여  $I_c = C dv/dt$ 의 전류를 Capacitor를 통하여 흘러넘으로서 가파른 PWM 파형의 전압 기울기를 작아지도록 하여 Micro surge 전압의 주파수 및 전압의 크기를 낮추어 Motor파손을 방지하는 Filter 방식이다.

이 방식을 용량이 큰 Inverter에 적용할 경우 Reactor가 용량에 맞게 커져야 하므로 Reactor의 비용이 크게 증가하고 Reactor가 파손되었을 때의 유지 보수비용이 막대하게 된다.

또한 소음이 크고 열이 많이 발생하며 Reactor 자체의 에너지 소모량도 매우 크므로 비경제적이다.

아래의 그림 9는 LCR Filter의 적용례를 나타낸다.

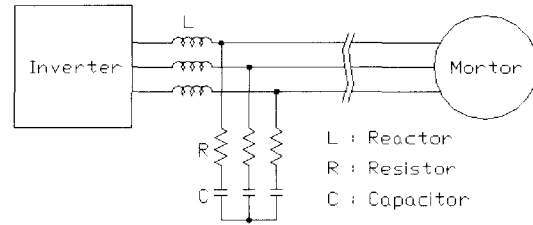


그림 9 LCR Filter 개념도

### 3.1.4 Motor의 입력 단자 측에 정류 방식 Filter로 Micro surge 전압을 억제하는 방법

방식의 기본 개념은 Inverter 출력의 DC link 전압은 Motor를 움직이는 구동력이므로 DC link 전압을 추적하여 DC link 전압보다 높은 Micro surge 전압을 소모시키는 것이다. 이 방식은 Motor의 입력단자 전압이 DC link 전압보다 일정한 높이 내에서 유지하도록 함으로서 Motor의 CIV 이하가 되도록 한다.

아래 그림은 적용례를 나타낸다.

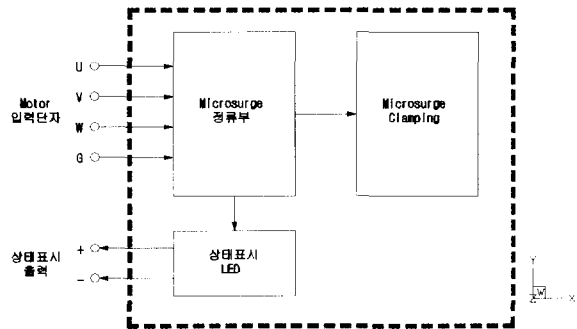


그림 10 정류방식 Filter 회로 개념도

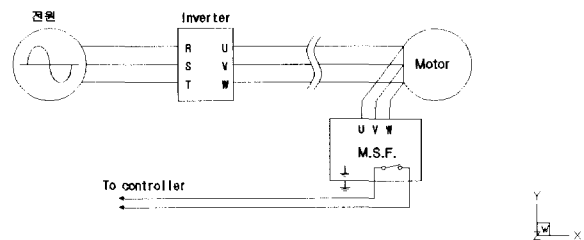


그림 11 정류방식 Filter 설치 개념도

《 NOTE 》

1. 위의 대책 중에 다음의 방법이 실용적이다.
  - 1) 신규 설비시에 절연 강화 Motor를 채용하거나, Motor 입력단자 전압을 낮춘다.
  - 2) 만일 Motor 입력단자 전압의 상태가 Micro surge를 구별하기 어려운 정도로 좋지 않은 경우에는 LCR FILTER를 설치한다.
2. 배선 길이가 짧을 때
  - 1) Inverter의 출력전류가 적을 경우(통상 20A 이하)에는 Inverter 측에 AC Reactor를 설치하여 전압의 상승을 억제하는 방법도 좋다. 단, Inverter의 출력측에 AC Reactor를 설치하여 Motor의 단자 전압을 CIV이하로 억제하고자 하면 여러 가지 사항을 고려해야 한다.
  - 2) 배선 길이가 120M 이하라면 Motor 입력단자에 병렬형 정류 방식 Filter를 설치하는 방법이 효과적이며 경제적이다.
3. Micro surge가 상간뿐만 아니라 상-접지 사이에도 발생하면 접지로부터의 Surge에 대한 대책이 필요하지만, 이 경우에는 직렬 삽입형 Filter는 설치가 불가능하다. 따라서 Motor 입력단자에 병렬형 정류 방식 Filter를 설치한다.

3.2. 각각의 대책시 장단점 및 사용상의 주의사항

3.2.1 절연강화 Motor

- (1) Micro surge로 인하여 Motor가 파손되는 현상은, Motor의 상과 상사이 또는 상과 접지(Case) 사이의 절연파괴로 인한 것이 아니라 Coil의 권선부에 Motor의 구동전원(Inverter 출력)이 입력되면, 한 상의 입력부분에서 동상의 권선사이에 Micro surge로 인한 절연파괴가 발생하는 것이므로 절연을 강화시키고자 하면 그림 6과 같이 Motor 권선의 입력부를 절연 강화된 전선으로 감아야만 하므로 제조에 어려움이 있다.
- (2) 부피가 커지고 중량이 증가하며 기계적인 문제가 발생할 수 있다.

3.2.2 Motor의 입력 단자 측에 RC Snubber를 적용하는 방법

- (1) Motor의 입력단자에 병렬 연결하므로 설치가 간편하다.
- (2) Motor 전류의 양에 따라 크기가 변하지 않으므로 LCR filter에 비해 가볍고 설치조건이 간단하다.
- (3) Inverter 패널에 설치하지 않고 Motor 입력 단자 쪽에 설치한다.
- (4) LCR Filter와 달리 di/dt를 제어하지 않고 dv/dt만

을 제어하여 Micro surge 전압을 억제한다.

- (5) Vector Inverter의 경우 Inverter의 부하인 상간의 Capacitance, 저항 등이 변화하므로 Inverter의 출력 Parameter의 조정이 필요할 수 있다.
- (6) Capacitor의 내전압, Ripple 전류 및 충격전류 특성, 저항의 내전압, 발열 등을 고려하여 설계하여야 한다.
- (7) Inverter의 Carrier Frequency가 높아지면 신뢰성이 떨어지므로 적용 가능한 Carrier Frequency가 제한적이다.
- (8) 모든 Motor에 개별적으로 설치한다.
- (9) 상과 상사이의 Micro surge 전압에 대해서만 억제가 가능하다.

3.2.3 Inverter 출력 측에 LCR Filter를 적용하는 방법

(1) Motor의 소음과 진동의 영향

위 3.1.3항의 FILTER가 소음이 나는 경우가 있지만 특별한 이상은 아니다.

- Motor의 소음 : Inverter에서 저소음 운전을 선택하고 있을 경우에는 특히 영향이 없다. 비저소음 운전을 선택한 경우에는 SURGE전압 억제 FILTER에 의해서 MOTOR소음에 약간의 개선 효과를 볼 수 있다.

- Motor의 진동 : 특별한 영향이 없다.

- (2) 1대의 Inverter로 여러 대의 Motor를 접속하여 운전할 경우 Inverter의 출력측에 일괄해서 설치하여 사용할 수가 있고, 복수의 Motor를 운전하여도 특별한 영향은 없다.

전류의 용량은 적용 Motor 전류 용량의 합으로 선정한다.

- (3) 설계내용에 따라 다르지만 일반적으로 약 7%의 전압 강하(정격 전류시)가 발생하기 때문에 Motor의 Torque가 부족하지 않도록 주의해야 한다.

- (4) Inverter가 대기상태에서 Motor의 여자(Motor를 구동시키지 않음)를 유지하기 위하여 여자 Pulse를 출력할 때 LCR Filter가 여자출력 Pulse에 영향을 주지 않도록 설계하여야 한다.

- (5) Vector Inverter의 경우 Inverter 부하인 Motor 사이의 Inductance, 상간의 Capacitance, 저항 등이 변화하므로 Inverter의 제어 Parameter의 조정이 필요할 수 있다.

- V/F제어시 : 시동 Torque가 충분하지 않은 경우에는 Torque Booster의 설정치를 3~5%가량 높여준다.

- (6) LCR 조합 회로이므로 Motor의 전류 용량이 증가하

면 Reactor(L)도 커지므로 cost가 올라가고 유지보수 비용도 증가하게 된다. 또한 전류 용량이 증가하면 크기가 증가하여 대용량의 경우 보다 넓은 별도의 설치공간이 필요하게 된다.

- (7) 상과 상사이의 Micro surge 전압에 대해서만 억제 가능하다.
- (8) Inverter의 Carrier Frequency가 높아지면 신뢰성이 떨어지므로 적용 가능한 Carrier Frequency가 제한적이다.

### 3.2.4 Motor의 입력 단자 측에 정류 방식 Filter를 적용하는 방법

- (1) Motor의 입력단자에 RC Snubber를 적용하는 경우와 같은 효과를 갖는다.
- (2) 상과 상, 상과 접지 사이의 모든 Micro surge 전압에 대해서 억제가 가능하다.
- (3) Inverter의 제어 Parameter의 조정이 필요 없다.
- (4) 여자출력에 영향을 주지 않는다.

- (5) Micro Surge Filter의 작동상태를 육안 또는 원격 확인이 가능하다.
- (6) Filter의 이상 발생시 전원 차단회로가 설치되어 있으므로 Inverter의 파손을 방지한다.
- (7) 소모전력이 매우 적다.(440VAC의 경우 80W)
- (8) 모든 Motor에 개별적으로 설치한다.

이상의 장단점을 종합적으로 비교하면 표 1과 같다.

### 3.3 Micro surge 대책의 효과

#### 3.3.1 절연강화 Motor

Motor의 절연을 강화하는 것은 Micro surge를 억제하여 Motor를 보호하는 것이 아니라 Motor 자체의 절연을 강화시켜 수명을 연장시키는 방법으로 절연 피복의 재질이나 두께에 따라 달라지게 된다.

#### 3.3.2 Motor의 입력 단자 측에 RC Snubber 또는 정류 방식 Filter를 적용하는 방법

표 1 대책방법의 차이에 따른 장단점 비교

순번	항목	RC Snubber	LCR Filter	정류방식 Filter
1	중량	가볍다	무겁다	가볍다
2	부피	작다	크다	작다
3	결선	병렬	직렬	병렬
4	설치위치	Motor terminal	Inverter panel	Motor terminal
5	억제방식	dv/dt	di/dt, dv/dt	정류, 평활
6	Parameter변화	작다	크다	매우작다
7	제한 Carrier Frequency	중간	낮다	높다
8	Torque Booster	불요	필요	불요
9	여자유지출력영향	작다	크다	매우작다
10	억제 단자	입력단자(상)	입력단자(상)	입력단자(상) 및 접지
11	작동상태 확인	-	-	가능
12	배선 길이	300M 이하	길수록 유리	300M 이하
13	입력차단회로	-	-	보유
14	소모전력	작다	크다	작다
15	착탈용이성	용이	어렵다	용이

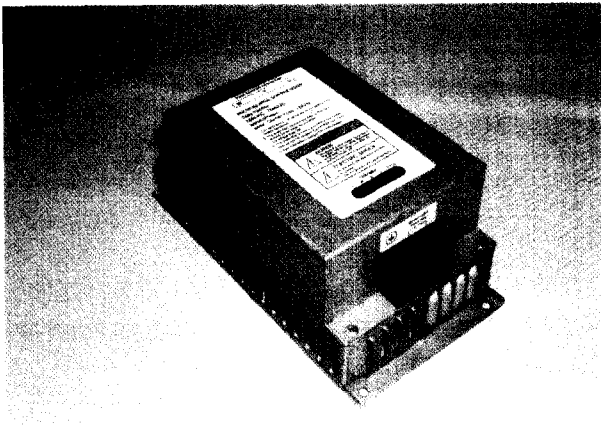


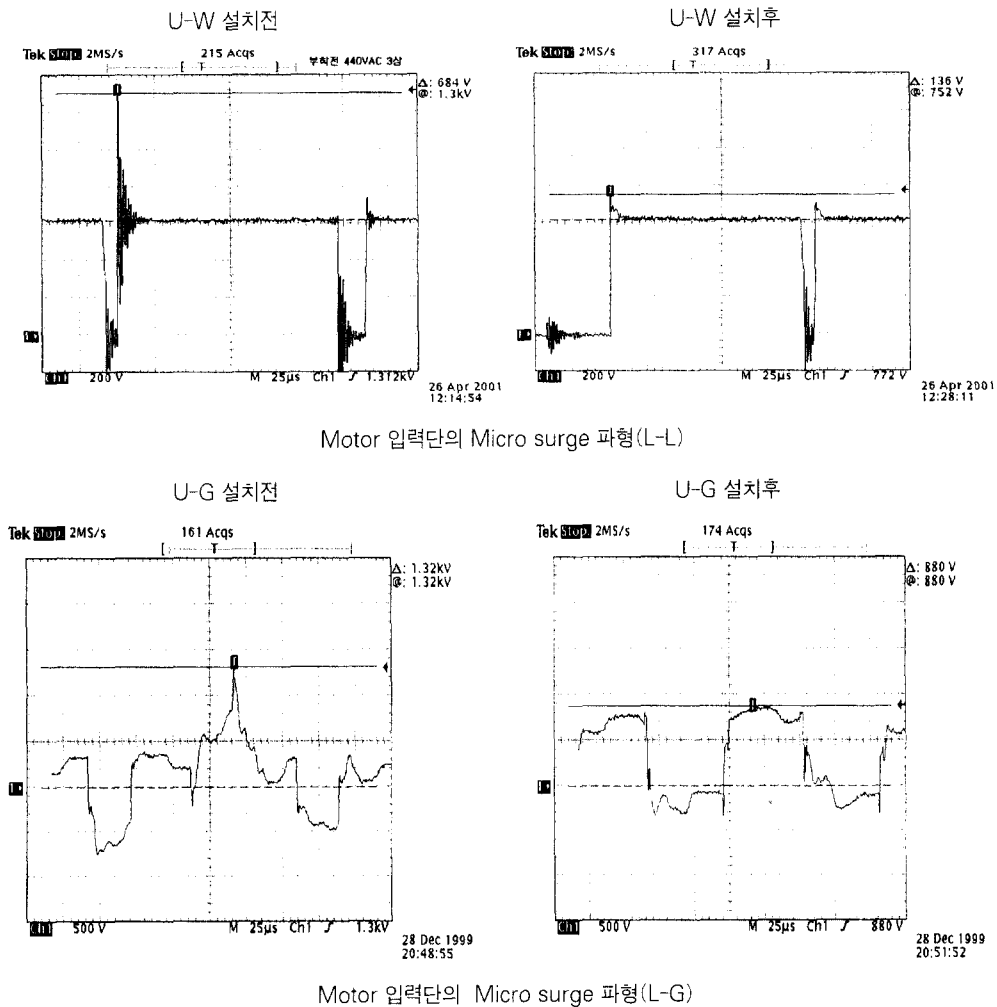
그림 12 SM3-7000 Series의 겉모양

Motor 입력단자에서 Micro surge를 제거하는 방법으로 RC Snubber 와 정류 방식 Filter의 효과는 유사하나 정류방식 Filter는 접지로부터 침입하는 Micro surge를 억제할 수 있다는 것이 차이점이다.

본 고에서는 정류방식 Filter인 “SM3 Series”를 소개한다.

아래는 440Vrms 또는 620V dc link로 구동되는 Motor용 Filter로서 제품 형상과 설치시의 효과를 보여주고 있다.

3.3.3 Inverter 출력 측에 LCR Filter를 적용하는 방법  
 $di/dt$  및  $dv/dt$ 의 크기를 줄여줌으로서 Micro surge 전압을 억제하며 효과는 다른 방법과 유사하다.



Motor 입력단의 Micro surge 파형(L-L)

Motor 입력단의 Micro surge 파형(L-G)

그림 13. SM3 Series의 Micro surge 억제효과

참고 문헌

- [1] 일본전기공업회기술자료 제169호
- [2] Riding the Reflected Wave : Lawrence A.Saunders, Gray L.Skibinski, Steve T.Evon, David L.Kempkes
- [3] Alsipa GD LOM technical Data and Installation Instructions : Cegelec Industrial Controls Ltd.
- [4] Filtering Techniques to Minimize the Effect of Long Motor Leads on PWM Inverter Fed AC Motor Drive Systems : A.von Jouanne, D.Rendusara, P.Enjeti, W.Gray
- [5] Filters for Adjustable Frequency Drives : Boris Mokrytzky
- [6] Interaction of Drive Modulation & Cable Parameters on AC Motor Transients : R.Kerkman, D.Leggate, G.Skibinski
- [7] Modeling and Damping of High Frequency Leakage Currents in PWM Inverter-Fed AC Motor Drive Systems : Satoshi Ogasawara, Hirofumi Akagi

〈 저 자 소 개 〉



**지옥조**

1957년 충남 보령 출생. 1982년 단국대학교 전자공학과 졸업. 1983년~1984년 SMPS용 HFT 개발(두고전자(주)). 1984년~1985년 2세대 CDP 국내 최초 개발(태광산업(주)). 1986년 ~ 1991년 EMI/EMI Filter 최초 국산화 및 개발((주)동일기연 개발부서장). 1991년~ 1992년 기술이사((주)화승전기). 1992년~현재 (주)오키 대표이사.