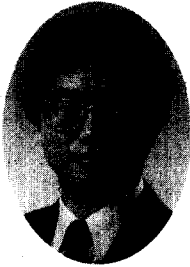


## 인버터 구동 유도전동기의 열화 특성



김정태

대전대학교 전기공학과 교수

### 1. 서 론

최근 전력전자 기술의 발달로 인해 유도전동기의 운전제어가 효율적으로 이루어짐에 따라 PWM 구동방식의 인버터가 상당히 보급되고 있다. 그러나, 기존 상용주파수 전압을 이용하여 유도전동기를 운전할 때 발생하는 열화와는 달리, PWM 인버터 구동시에는 기존과는 다른 형태의 전압이 인가되어 일반적으로 사용되는 저전압 유도전동기에 여러 가지 문제점이 도출되고 있다. 이러한 문제점을 정리하면 다음과 같다.

- 전동기 단자에서 과전압 발생 : IGBT와 같이 PWM 제어에서 빠른 전압상승을  $dV/dt$ 를 나타낼 때, 인버터와 전동기를 연결하는 케이블의 길이에 따라 반사파가 일어나, 인버터 직류단 전압의 거의 두 배에 달하는 과전압이 전동기에 가해짐. 이것은 일종의 충격파로서 전동

기 권선의 초입부분의 절연열화 또는 절연파괴를 유발함.

전동기 베어링 전류 문제 : 전동기 베어링의 그리스가 부분적인 절연 역할을 하게 되어, 전압상승을  $dV/dt$ 가 높을 때 전류가 크게 흘러 절연파괴되고 이로 인해 베어링에 흠집을 만들어 열화시키게 됨. 인버터 구동시에는 높은  $dV/dt$ 로 인해서 더 빨리 열화될 수 있음.

자기적(magnetic) 그리고 구조적 불균일함 : 모든 전동기에서 이러한 불균일함이 상당히 존재하며, 특히 인버터 파형에 포함되어 있는 고주파에서는 더욱 더 심해지며 이 문제에 대한 분석은 상당히 복잡함.

- 전자파 장애(EMI) : 높은 IGBT 스위칭 속도는 광대역의 EMI를 유발시키며, 이로 인해 제어와 기타 전자회로장치에 간섭을 일으킬 수 있음.

- 접지 전류 : 높은  $dV/dt$ 가 전동기 권선과 전동기 프레임 사이의 커패시턴스와 관련되어 접지 도체부로 회귀하여 흐르는 큰 전류가 유발됨. 이 전류로 인해 전동기로 연결된 케이블의 전선관을 가열시키고 보호 접지전류 릴레이를 동작시키게 됨.

- 전동기 과열 현상 : PWM 구동으로 인해 나타나는 저차 고조파 전압으로 인해 고조파 토크가 발생되고 이로 인해 고조파 진동이 발생되며 이 중 대

부분은 열적에너지로 나타나 전동기가 과열됨. 이에 따라, 기존 보다 한 등급 상위의 정격을 갖는 전동기를 사용할 필요도 있음.

이상과 같이 언급한 문제점 중에서 특히 전동기 단자에서의 과전압 발생은 전동기의 절연에 치명적인 문제를 유발시킬 수 있으므로 저전압 유도전동기의 장기 신뢰성에 상당한 영향을 미친다. 따라서, 본 고에서는 PWM 구동시 과전압 발생원리 및 저전압 유도전동기에 미치는 영향 그리고 이에 대한 대책 등에 대해 고려했고자 한다.

### 2. 전동기 단자의 과전압 발생 이론

#### 2.1. 기본배경

최근 PWM 구동으로 많이 사용되는 IGBT 다단계 전압원 인버터는 수백 nsec 동안에 스위칭을 할 수 있으며, 이 빠른 스위칭 시간으로 인해 인버터의 효율이 매우 좋아진다. 따라서, IGBT의 사용은 나날이 증가되고 있다. 그러나, 매우 빠른 스위칭 turn-on 시간을 만들기 위해서는, GTO와 같은 싸이리스터에서 전압 서어지의 상승률을 조절하는데 사용되는 스너버 회로를 적용할 수 없게 된다. 이것은 스너버 회로의 커패시터로 인해 트랜지스터에 흐르는

전류가 너무 커져 손상을 주기 때문이다. 따라서, IGBT 인버터는 어쩔 수 없이 파도가 급격한 서어지를 발생시킨다.

일반적으로 허용소음값과 낮은 스위칭 손실을 위해 IGBT의 스위칭 주파수를 20 kHz 이상으로 하고, 승압시간은 20 nsec 이상 보통 100 nsec 정도로 한다. 이에 따라 전압은 15 MHz 이상까지의 고조파 성분을 갖는다.

PWM 인버터와 전동기가 산업에 상당히 유용하게 사용되고 있으나, 보통 인버터 장치와 전동기 사이에는 어느 정도 거리가 떨어져 있다. 고주파 스위칭 주파수는 PWM 인버터의 성능을 개선시키게 되지만, 전형적인 IGBT 인버터의 경우 6 kV/μsec 정도로 높은 전압 상승률(dV/dt)로 인해 전동기 절연에 영향을 주게 되고 베어링 전류에 기여하게 된다.

참고로 현재 IEC에서 추천하는 전동기 단자에서의 최대 허용 승압값은 500 V/μsec 이하로 되어 있다.(IEC 2(CO) 566) 이러한 규격은 NEMA MG1-30에도 나타나 있으며, 정격 전동기의 절연능력은 2 μsec의 상승시간에 1000V의 피크값으로 상승되는 것을 견뎌야 하는 것으로 나타나 있다. 그러나, 이러한 규격은 IGBT 인버터의 경우에는 적용하기 어려운 점이 있다. 한편, 인버터 구동 전동기의 절연열화를 고려하여 제시되고 있는 규격이 최근 NEMA MG1-31로 도출되었는데, ASD (adjustable speed drive : 인버터 구동)를 사용하는 전동기는 1,600 V의 피크값으로 상승되는데 0.1 μsec 이상의 상승시간이 되도록 작동되어야 하는 것으로 되어 있어 16 kV/μsec 이하의 상승률을 가져야 하는 것으로 되어 있다.

아울러, 인버터와 전동기를 연결하는 케이블이 긴 경우에는 케

이블의 누설 인덕턴스와 커플링 커패시턴스의 분포성으로 인해 전동기 단자에 고주파 감쇄 진동을 유발하게 되며, 이로 인해 전동기 절연에 과전압과 추가적인 스트레스가 가해지게 된다. 또한, 전압의 반사는 인버터 출력펄스의 상승시간과 인버터 출력펄스의 송전선로 역할을 하게 되는 전동기 케이블의 길이에 대한 함수이다. PWM 펄스는 거의 빛의 절반속도(150 ~ 200 m/μsec, 500 ft/μsec)로 전파한다.

## 2.2. 반사파 전압 분석

일반적으로 PWM 펄스가 인버터에서 전동기까지 전파하는 시간이 PWM 펄스 파도(상승)시간의 1/3 보다 길게 되면, 전동기 단자에서 완전반사가 일어나고 펄스의 크기는 거의 두 배로 된다는 것을 밝히고자 한다.

인버터와 전동기를 연결하는 케이블에서 PWM 펄스는 송전선로에서 진행파와 같이 케이블을 전파한다. 순방향 진행파 또는 PWM 펄스는 인버터에서 전동기로, 역방향 진행파는 전압반사에 의해 전동기에서 인버터로 전파한다. 이 때, 케이블의 임피던스에 비해 전동기의 임피던스가 상당히 크기 때문에 진행파인 PWM 펄스는 전동기 입력단에서 반사가 일어나고, 반사파와 입사파의 합은 전동기 단자에서 두 배의 전압으로 된다.

전자기파 전송이론과 전압 반사 분석으로부터, 반사에 의한 전동기 단자에 걸리는 피크 전압의 크기는 다음 식과 같이 결정된다.

$$V_{peak L-L} = \frac{3l_c V_{dc} \Gamma_L}{v t_r} + V_{dc} \quad (t_l < t_r/3 \text{ 일때}) \quad (1)$$

또는

$$V_{peak L-L} = V_{dc} \Gamma_L + V_{dc} \quad (t_l \geq t_r/3 \text{ 일때}) \quad (2)$$

여기서,  $l_c$  : 케이블 길이,

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_c C_c}} : \text{전파속도,}$$

$L_c$  : 단위 길이당 인덕턴스,

$C_c$  : 단위 길이당 커패시턴스,

$V_{dc}$  : 인버터 직류단 전압,

$\Gamma_L$  : 부하에서의 반사계수

(보통 20 마력 이하의

전동기인 경우 0.9)

$t_r$  : 인버터 출력펄스의 상승

시간 [μsec]

식 (2)와 같이  $t_l \geq t_r/3$  로 전파시간이 상대적으로 긴 경우, 전동기 단자전압은 케이블 길이와는 관계없이 두 배 정도로 된다. 아울러,

$$\frac{3l_c \Gamma_L}{v t_r} \ll 1 \quad (3)$$

인 조건이라면 과전압의 발생은 없게 된다.

이러한 조건에 따라, 전동기 단자에서 전압이 두 배로 되는 최소 케이블 길이를 펄스 상승시간에 대해 표 1에 나타내었다. 표에

표 1. 전동기 단자전압이 두 배로 되는 최소 케이블 길이와 펄스 상승시간과의 관계

PWM 펄스 상승시간	단자전압 두 배되는 케이블의 최소 길이
0.1 μsec	19 ft
0.5 μsec	97 ft
1.0 μsec	195 ft
2.0 μsec	390 ft
3.0 μsec	585 ft
4.0 μsec	780 ft
5.0 μsec	975 ft

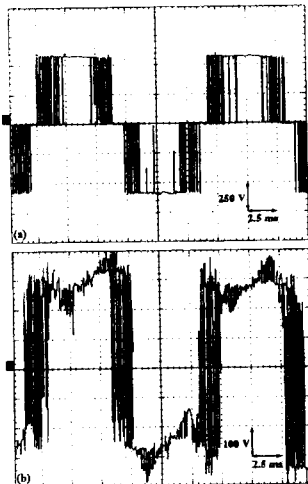
나타난 길이 이상의 케이블이 가설될 때 전동기 단자전압은 두 배로 된다. 케이블의 임계 길이는 인버터 출력펄스의 상승시간이 짧을수록 즉, 상승률  $dV/dt$ 가 클수록 짧아지는 것을 알 수 있다.

### 3. 전동기 단자의 과전압에 의한 열화

#### 3.1. 인가 전압 스트레스

##### 3.1.1. 입력단 전압파형

저전압 선로에서 인버터로부터 전동기에 인가되는 전압은 일정한 크기를 갖고 펄스 폭으로 조절되는 '선전압'으로서 그림 1.(a)와 같으며 전동기의 토크를 발생시키는 고정자 전류를 유발시키게 된다. 전동기의 절연에 가해지는 전압은 이 선전압이 아니라 고정자 철심 즉, 국부적인 접지에 대한 전압으로 그림 1.(b)와 같은 '상전압'이다. 변조 주파수는 스위칭 주파수와 동기되지 않아 절연체에 가

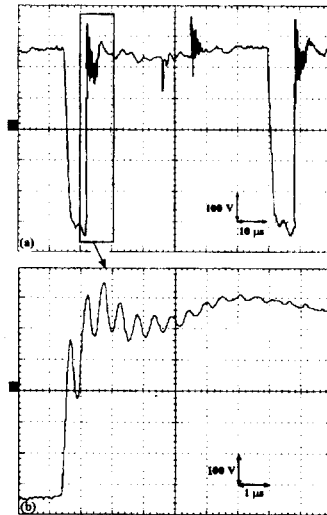


(a) 고정자 권선에 가해지는 선전압 (b) 전동기 단자에서 대지절연에 인가되는 전압에 해당하는 상전압

그림 1. 전동기의 선전압과 상전압

해지는 모든 펄스는 달라지게 된다.

시간축을 늘려보면, 다른 종류의 펄스가 관측된다. 급격한 파도 ( $> 1000 \text{ V}/\mu\text{sec}$ )로 인해 케이블에서 반사가 일어나 서어지가 유발된다. 실제로 반사 현상으로 인해 펄스의 앞 부분에서 고주파 진동(2 MHz)과 overshoot(600 V)가 발생된다. 또한, 이 고주파 진동은 다른 두 상과 커플링되어 같은 overshoot가 두 상의 펄스들에 바로 중첩된다. 선전압과는 반대로 절연체에 직접적으로 전기적 스트레스를 주게되는 상전압은 3상 상호 간섭으로 이어져, 펄스는 그림 2.(a) 및 (b)에서와 같이 하나의 overshoot 보다 많게 나타난다.



(a) 두 개의 과전압으로 나타나는 전동기 단자에서의 전형적인 전압 펄스 (b) 상승 파도를 확대한 파형 (2 MHz 진동)

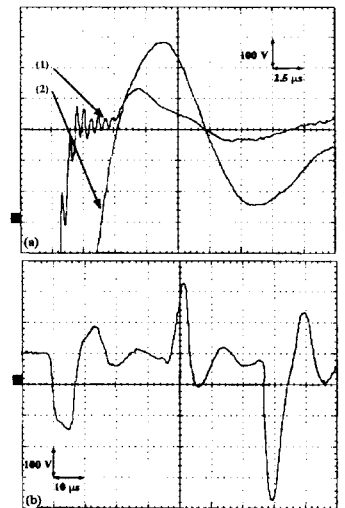
#### 그림 2. 펄스의 과전압

##### 3.1.2. 고정자 권선의 과전압

일반적으로 여러 개로 구성되어 있는 전동기 코일에 빠른 상승시간 즉, 큰  $dV/dt$ 를 갖는 전압이

입력되면 첫 번째 코일에 가장 큰 전압이 걸리게 되고 두 번째 이후의 코일 부터는 인덕턴스 효과로 인해 과도전압이 작게 가해지는 것으로 알려져 있다.

6 개의 코일로 구성되도록 특별히 제작한 전동기로부터 펄스의 전파 과정을 관측해 보면, 서어지 펄스가 전파될 때 권선의 임피던스로 인해 서어지의 크기가 줄고 상승시간이 느려진다. 그렇지만, 서어지가 초기 펄스와 중첩되면 전체적인 크기는 높게 유지되고 그림 3.(a)와 같이 거의 550 V까지 이르게 된다. 여기서, 균형적인 정현파 시스템과는 대조적으로 중성점의 전위는 접지전위로 유지되지 않는다는 점에 유의하여야 한다. 실제로 중성점의 전위는 3상 시스템이 균형적이지 않으므로 그림 3.(b)와 같이 진동하게 된다.



(a) 전동기 단자에서의 전형적인 상승 파도 (1) 과 권선 중간에서의 상승 파도 (2) 비교 (b) 3상 불평형에 의한 중성점 전위의 전형적인 전압 펄스

그림 3. 상승 파도의 비교 및 중성점 전위의 진동

권선에 걸리는 전압의 분포는 비선형적이다. 실제로 두 번째 코일에서 권선 인덕턴스의 효과로 인해 파두는 초기값의 80% 정도로 제동되며, 첫 번째 코일에서 나타나는 고주파 진동도 사라진다. 이러한 현상으로 인해 비정상적인 과전압이 첫 번째 코일에 가해져, 그림 4.(a,b)와 같이 코일의 인입부와 끝 부분간에는 400V 정도의 차이가 나타난다. 두 번째 코일에서는 인덕턴스 효과가 나타나며, 그림 4.(c,d)와 같이 첫 번째 코일에서 보다 작은 200V 정도의 차이로서 진동이 없는 과전압이 가해진다. 세 번째 이상의 코일에서 과전압은 50V를 넘지 않는다. 대부분의 저전압 전동기의 경우인 비형권 전동기에서는 첫 번째와 마지막 권선이 접촉될 수 있으며, 이러한 경우에는 첫 번째 코일의 권선간 절연은 450V 이상의 절연 내력을 가져

야 한다. 이 전압레벨은 기존의 상용주파(50 또는 60 Hz) 교류 전원에서 일반적으로 고려되던 절연 내력(36 V)에 비해 상당히 높은 값이다. 결과적으로 60 Hz의 경우에 권선은 각 권선이 작고 같은 전압(2 V)을 견디게 되는 분압기와 같이 이상적으로 나타낼 수 있게 된다.

이러한 값들을 표 2에 나타내었으며, PWM의 경우에는 정현파의

경우보다 훨씬 과도한 스트레스가 가해진다는 것을 알 수 있다.

## 3.2. 과전압이 전동기 절연에 미치는 영향

### 3.2.1 전동기 권선의 종류

인버터 구동(ASD : Adjustable Speed Drive)으로는 완벽한 정현파를 구현할 수 없기 때문에, 저전압 인버터 구동 뿐 아니라 중전압급(2300V - 4160V) 인버터 구

표 2. 상용주파(50 Hz)와 PWM 구동의 경우 특성 비교

구 분	상용주파 시스템	PWM 구동
고조파 [Hz]	50	50,150,16k,2M,11M
상승률 [V/μsec]	$15 \times 10^{-5}$	1k~5k
평균 상승시간 [μsec]	5,000	0.1~1
단자-대지절연 전압 [V <sub>max</sub> ]	311	600
중성점 전위변동 [V <sub>max</sub> ]	2.15	80
첫 번째 코일전압 [V <sub>max</sub> ]	36	450

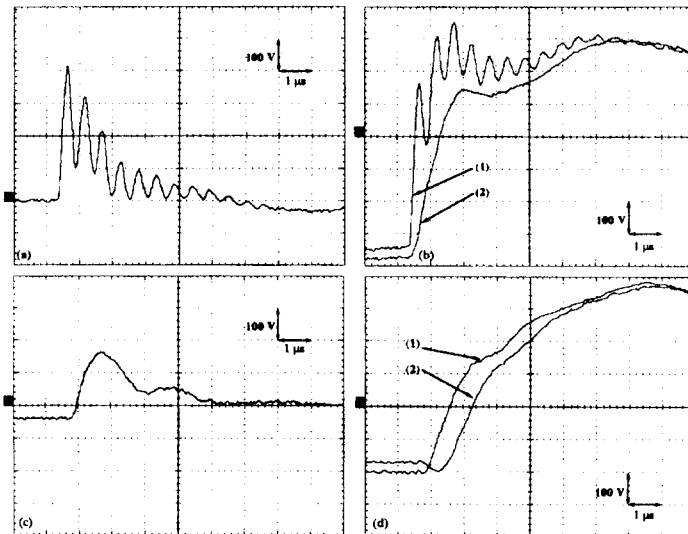


그림 4. 코일에 걸리는 과전압 비교  
(a) 첫 번째 코일에 걸리는 과전압 (첫째 코일 입/출력단 전압인 그림 (b) (1)과 (2)의 차이) (c) 두 번째 코일에 걸리는 과전압 (둘째 코일 입/출력단 전압인 그림 (d) (1)과 (2)의 차이)

그림 4. 코일에 걸리는 과전압 비교

의 경우 전압상승시간이 짧은 전압 서어지가 발생될 수 있고 이로 인해 전동기의 고정자 권선 절연에 영향을 미치게 된다. 이와 같은 문제점은 전동기의 권선 형태에 따라 달라지게 되며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

#### ① 형권(form winding)

- 주로 중전압급에 사용
- 직사각형 단면의 코일을 절연시킨 뒤, 테이프를 감고 기포를 제거하면서 합침시킴.
- 권선은 순차적으로 되어있어 첫 번째 권선이 두 번째 이외의 다른 권선과 접촉되지 않음.

#### ② 비형권(random winding)

- 주로 저전압급(600V 이하)에 사용
- 원형 단면의 절연 코일을 사용

- 권선을 슬롯에 막 집어넣어 첫 번째 권선이 마지막 권선과도 접촉될 수 있음.
- 진공 함침시키는 경우에도 코일들의 교차가 많고 코일 단면이 원형이므로 기포가 존재할 가능성이 많아, 부분방전의 발생 가능성이 높음.

### 3.2.2. 과도전압에 의한 전동기 절연의 문제점

전술한 바와 같이 인버터 구동 유도전동기의 경우 반사파로 인한 과도전압이 전동기에 인가되며 이론적으로 반사파는 최대 2 배의 전압이 가해지지만, 실제로는 인버터 자체에서 발생하는 spike 전압 등의 효과로 인해 최대 3 배까지 이를 수 있다.

급격한 파동을 갖는 서어지 전압이 전동기 절연에 미치는 영향에 대해서는 주로 고전압 전동기에 대해 연구되어 왔으며, 서어지의 주 원인은 차단기 동작시에 발생하는 것으로 전동기 전체 수명 동안 100,000회의 전원 동작을 한다면 역시 100,000회의 서어지가 가해지는 것이다. 과도 전압은 주로 고전압 전동기 단자에 연결된 전동기 권선의 권선간 절연에 불균일하게 커다란 전압이 가해지게 되며, 권선의 초기 몇 회 정도의 코일에 큰 전압이 가해진다. 이 때, 과도전압이 권선간 절연의 파괴 강도를 넘게 되면 절연파괴가 일어나고, 이로 인한 대전류에 의해 대지절연체가 녹아내려 전동기 사고가 발생한다. 비록 신제품의 경우 서어지에 의한 절연파괴 내력이 우수하더라도, 권선 절연은 오랫동안 열적/기계적 에이징에 의해 점차적으로 열화된다.

인버터 구동의 경우, 저전압 PWM 서어지가 고정자 권선 절연의 사고를 유발할 가능성이 있

다고 지난 수 년간 언급되어 왔으며, IGBT를 사용한 PWM 구동 타입은 상승시간이 0.1 msec 정도 되는 서어지를 초당 수 천번 발생시키므로, 수 시간 정도의 운전에

### 3.2.3. 인버터 구동 저전압

전동기의 부분방전 측정 전동기 고정자 권선 절연은 기존의 운전방식에서 30년 동안 경험하는 서어지를 받게 된다.

그러나, 저전압 전동기의 경우 전압레벨 자체가 낮으므로 정상적인 절연이 되어있는 전동기의 경우 이와 같은 서어지에 의한 절연 열화에 대해서 보고된 바는 없으며, 저전압 전동기에서 인버터 구동시 절연열화 사고가 일어나는 것에 대해서는 주로 절연체 내에 동공(기포)이 존재할 경우 부분방전 열화로 인한 절연파괴가 일어날 수 있는 것으로 추정되고 있다.

전술한 바와 같이 인버터 구동 저전압 전동기의 절연열화는 주로 부분방전과 관련되어 있다. 그러나, 현재까지 인버터 구동 전동기 시스템에서 부분방전을 정확히 측정할 수 있는 방법은 정립되지 않고 있다. 이것은 일반적인 부분방전 측정시스템을 적용하기 어렵기 때문이다. 기존의 부분방전 측정은 노이즈 성분이 없는 상용 주파수(50 또는 60 Hz) 전압을 시험 대상에 인가하여 발생하는 부분방전을 주로 10 ~ 300 kHz 범위에서 측정하게 되는데, 인버터 구동의 경우에는 20 kHz 이상의 스위칭 주파수로 인해 출력전압에는 이 주파수가 기본적으로 포함될 뿐 아니라 출력파형도 정현파가 아닌 사각파이므로 수많은 고조파 성분이 광범위한 주파수 대역에 걸쳐 전원에 포함되므로, 기존의 측정방법을 이용할 경우 전원에서 발생된 것인지 아니면 실제 부분

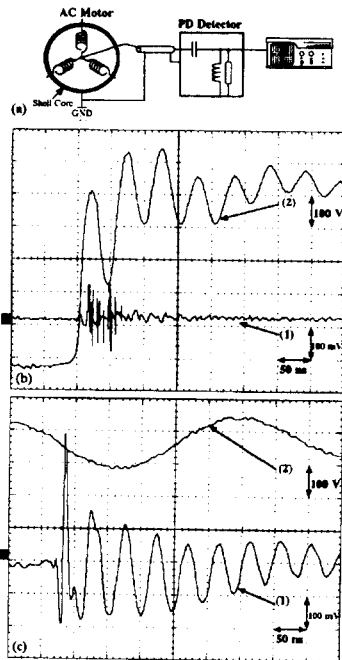
방전에 의한 것인지 알 수 없게 된다.

따라서, 대부분 전동기 자체가 아니라 고정자 권선만을 대상으로 인버터 전원을 인가하여 부분방전 발생시에 나타나는 미소 방광을 포토멀티플라이어를 이용하여 측정하거나, 전동기에 고주파 정현파 전압을 인가하여 부분방전을 측정하는 방법들이 제시되었으나, 이러한 방법들은 실제 전동기 단품 자체에 대한 시험방법으로는 거리가 멀다.

그러나, 최근 부분방전이 나타내는 주파수가 수 십 MHz 대역까지 발생된다는 점을 이용하고 그림 3.(b)에 나타난 중성점 전위는 아주 높은 고주파 전압이 아니라는 점에 착안하여, 인버터 구동 전동기의 중성점과 접지간의 전압을 적당한 필터를 사용하여 부분방전을 측정할 수 있는 방법을 다음과 같이 고안하였다.

PWM 구동시에는 펄스열이 계속적으로 발생되므로, 기존의 상용주파수에서 적용되던 부분방전 측정 주파수 대역 보다 높은 10 MHz 이상의 대역으로 고려하여야 한다. 아울러, 사각파 형태의 PWM 펄스로 인해 고조파 성분은 스위칭 주파수 이상의 고주파가 되므로, 보다 효과적인 전원자체의 고주파 필터링을 위해서는 고정자의 중성점에 센서를 설치하여야 한다. 즉, 권선의 인덕턴스 성분으로 인해 그림 3에 나타난 바와 같이 첫 번째 코일에서는 반사파로 인한 고주파 진동이 나타나지만 두 번째 코일에서는 고주파 진동이 사라진 것을 알 수 있으며, 이에 따라 중성점의 전압에서 고주파 진동이 나타나지 않기 때문에 중성점에서 부분방전을 검출할 경우에는 부분방전 신호만을 효과적으로 검출할 수 있다. 그림 5.(a)에 이러한 부분방전 측정

회로의 개념을 나타내었으며, 그림 (b)는 전동기에 걸리는 상전압(전동기 단자전압)과 부분방전 출력전압을 같이 나타내었고, 그림 (c)는 확대한 것이다. 여기서, 부분방전 펄스는 고주파이고 상당히 저전압이기 때문에 이러한 인덕턴스 효과에 그다지 영향을 받지 않는다. 실제로 모의 실험으로 1 V 이하의 고주파 미소 전압을 전동기에 인가하였을 때 거의 모든 코일에서 측정 가능하였다.



(a) 전동기에서의 부분방전 측정 회로 (b) 상전압(전동기 단자전압)과 부분방전 출력전압 (c) 그림 (b)의 확대

그림 5. PWM 구동 전동기에서의 부분방전 측정

이러한 회로를 이용하여, 360 V의 상용주파수 전압을 전동기에 인가하고 전술한 부분방전 측정장치를 설치하였을 때 예상되는 바와 같이 중성점에서는 어떤 고주

파 신호도 검출되지 않았다. 다음으로, 고정자의 단일 코일에 대해 상용주파 전압으로 절연 한계 전압 이상인 최대 650V의 전압을 인가하였을 때에도 펄스는 발생하지 않았다.

이제 PWM 구동시의 측정 결과에 대해 언급하면 다음과 같다. 회전 속도를 300 ~ 3000 rpm (10 ~ 100 Hz)로 천천히 증가시켰다. 600rpm(20Hz)까지는 간헐적인 펄스가 관측되었으나 고주파 신호는 나타나지 않았다. 이 간헐적인 펄스들은 1500rpm(50Hz)까지 점차적으로 그 숫자와 크기가 증가하다가 현저히 감소하였고 그 후에는 그림 6.(b)와 같이 안정화되었으며, 이 펄스들은 부분방전에 의한 것임을 알 수 있었다. 이 부분방전 펄스들은 주로 PWM 구동 펄스의 초기에서 발생되었고 반사와 진동의 중간에서는 조금 발견되었다. 그러나, 측정은 상당히 어려웠다. 왜냐하면, 오실로스코프에서 부분방전 신호를 잡기 위한 동기화가 어려우며, 그림 1.(b)에서와 같이 구동펄스의 크기가 일정하지 않기 때문에 통계적 처리가 불가능하였다.

상용주파 전압에서는 650 V 정도의 높은 전압레벨에서도 부분방전이 발생하지 않았으므로, 이것은 권선-대지간 절연체에 작은 동공들이 존재하지 않는다는 것을 의미한다. 그렇다면 이러한 점으로 PWM 구동에서 650 V 보다도 높지 않은 전압레벨에서 부분방전이 발생하는 이유를 설명할 수는 없으며, 다음과 같이 고려할 수 있다.

먼저, 인가전압의 고주파 성분이 부분방전 개시전압 레벨을 저하시킬 수 있다고 생각할 수 있으나, 아직까지 PWM 구동 펄스의 빠른 상승시간이 부분방전 개시전압레벨에 미치는 영향에 대해서는

밝혀진 바가 없다. 다음으로 생각할 수 있는 점은, 상용주파 전압에서는 대지절연에 스트레스가 가해지지만, PWM 구동의 고주파 과도전압은 권선간 절연에 최대 450 V 까지의 스트레스가 가해질 수 있다는 것이다. 따라서, 일반적으로 대지절연 보다는 약한 권선간 절연에서 부분방전이 발생한다는 가정으로 결론지어진다. 사실, 저전압 유도전동기의 제조 과정에서 코일 함침은 그다지 중요하게 여기지 않고 있다.

단지 이 마지막 가정에서의 문제점은 회전속도와 무관하게 인가되는 선전압은 일정하다는 것이다. 따라서, 30 ~ 300 rpm (10 ~ 100 Hz)의 회전속도 전체의 범위에 걸쳐 항상 일정한 수의 펄스가 발생되어야 한다. 그러나, 실제로 이러한 점은 관측되지 않았으므로, 어떤 외부적인 요인으로 인해 부분방전 펄스의 개시에 간섭이 일어난다고 생각할 수 있으며, 이것은 아마도 전동기의 진동 때문일 것이라 추측할 수 있다. 실제로, 진동은 속도의 함수로서 변하고 그 크기의 최대값은 주로 운전 주파수에서 나타나며, 이러한 사실은 부분방전 측정 결과와 어느 정도 일치하여 운전주파수인 50 Hz에서 펄스 수가 최대로 관측되었다. 이것은 전동기의 진동이 권선간 절연과 대지절연에서의 부분방전 개시를 자극시켰다는 것을 의미한다. 표 3에 측정결과와 양상에 대해 정리하였다.

### 3.2.4. 부분방전 열화에 대한 결론

인버터 구동 저전압 전동기에서 부분방전은 서로 닿아있는 에나멜 선 사이의 공극에서 발생되며, 절연체를 손상시키고 결과적으로 권선간 절연과피로로 이어지게 되며, PWM의 높은 스위칭 주파수, 짧

표 3. 부분방전 측정결과 분석

전원공급 조건	부분방전 발생	부분방전 개시	커다란 진동
50Hz 정현파	×	×	×
단상, 최대 650V	×	○	×
PWM, 300rpm	×	○	×
PWM, 1500rpm	○	○	○

은 전압상승시간 및 빠른 진동 펄스들로 인해 수명이 짧아진다. 그러나, 부분방전이 발생되지 않는 경우에는 상당히 높은 전기적/열적 스트레스 하에서 2년 후에도 절연파괴는 일어나지 않는다.

권선간 절연에서 부분방전을 피할 수 있다면 인버터 구동 저전압 전동기의 수명은 만족할만하게 얻어질 수 있다. 이것은 짧은 케이블과 적당한 필터 또는 낮은 직류 전압을 이용하여 전압상승시간과 단자 전압의 크기를 적절히 함으로써 가능해진다. 아울러, 부분방전 개시전압이 낮아지는 것을 피하기 위해 적절한 절연설계에 주의 기울여야 한다.

부분방전 개시전압은 온도 상승과 절연두께 감소에 따라 감소된다. 전기적 특성을 개선하기 위해, 권선간 갭을 완전히 함침시켜야 한다. 비효율적이지만 또다른 방법은 절연두께를 증가시키는 것이다. 주 절연과 상간 절연으로 reinforcing wrapper material을 적용시키는 것도 배제할 수 없다.

권선간 절연을 보호하기 위해 500 V/μsec의 dV/dt로 단자전압을 제한[IEC2(CO)566]하는 것은 빠른 스위칭 컨버터의 경우 허용 전압레벨을 너무 낮게 만들며 실제로 구현할 수 없게 된다. 따라서, 전기적 열화에 대해 저전압 권선간 절연을 보호하기 위해서는 부분방전 개시전압과 권선의 과도 전압분포 보다 작게 단자전압을 설정할 필요가 있다.

최근에 개정된 IEC Document 34-17에서는 이러한 요소들을 고려하여 전동기 단자에서의 허용 펄스 전압의 보다 적절한 한계곡선을 전압상승시간의 함수로 제공하고 있다.

### 5. 인버터 구동 저전압 전동기의 절연열화 대책

인버터 구동 전동기의 열화는 주로 과전압에 의한 부분방전으로 인한 것이므로, 이에 대한 대책 역시 과전압의 발생을 저감시켜 부분방전 열화를 줄이거나 부분방전이 일어나더라도 내부분방전성이 큰 절연재료를 사용하는 방법이 제시되고 있다. 이러한 방법을 개략적으로 나타내면 다음과 같다.

- 저전압 시스템(230V 정도)의 적용
- 인버터에서 긴 전압상승시간 채택
- ASD와 전동기 간의 케이블 길이 최소화
- 전동기 단자전압의 overshoot 방지와 상승시간을 길게하는 필터의 적용
- 인버터와 전동기 사이에 직렬 리액턴스(ACL) 삽입 : 직렬 리액턴스는 전류 제한 소자로 역할을 하고 PWM 파형을 필터링하며 전기적 노이즈를 감쇄시키지만, 인버터 구동장치의 과도적인 성능에 영향을 미치고 다른

해결책에 비해 부피가 크고 비경제적임.

- 전동기 단자에 1 차 필터 적용 : 케이블 특성 임피던스와 같은 값의 필터 설치로 반사파 제거
- 인버터 출력단에 RLC 필터 적용 : 인버터 출력전압의 dV/dt를 줄임.
- 전동기에 form winding 권선 적용 (가격상승이 크고 소용량에는 적용 못함.)
- random winding이라도 순차적인 권선 배치
- form winding과 같이 슬롯에 순차적으로 넣는 방법
- 부분방전 개시전압은 절연두께의 제곱근에 비례하므로, 더 많은 절연을 하는 방법 (슬롯의 크기가 커짐)
- 전동기의 상간에 절연을 강화시키는 방법
- 전동기 단자선과 가까운 권선에 절연 슬리브를 추가 설치하는 방법
- 부분방전 열화에 강한 권선 절연 적용 (TQ\*(quantum shield)라는 필름 권선 코팅)

### 참 고 문 헌

1. A. Mbaye et al., IEEE Trans. on DEI, Vol. 3, No. 4, p.554, 1996
2. Electrical/Electronic Insulation Conference, Chicago, p.417, 1995
3. IEEE IA Magazine, Jan/Feb, p.12, 1995
4. IEEE IA Magazine, Jan/Feb, p.16, 1995
5. IEEE Trans. on IA, Vol. IA-32, No.2, p.250, 1996
6. IEEE Trans. on IA, Vol. IA-27, No.6, p.1175, 1991
7. IEEE Trans. on IA, Vol. IA-31, No.6, p.1247, 1995

< 이준호 위원 > < 김정태 위원 >