

인버터 스위칭전압 파형에 의한 전동기 권선 영향 해석

(Analysis of Motor Winding Impact by Inverter Switching Voltage Waveforms)

김 종 검*

(Jong-Gyeum, Kim)

요 약

본 논문은 PWM인버터 장치의 스위칭 서지에 관한 문제를 분석한 것이다. 교류 전동기의 효율적인 속도제어를 위한 가변속 구동 장치의 적용이 증가함에 따라 전동기와 가변속 구동장치에 관련된 고장이 발생한다. 산업용 전동기 설비에 PWM 드라이브의 도입은 때때로 높은 과도전압 피크에 의한 상권선 사이 절연파괴를 낳을 수 있다.

높은 스위칭 주파수와 결합한 전동기 케이블 길이는 적절한 드라이브 동작을 위한 매우 민감한 문제가 된다. 케이블 길이와 높은 스위칭주파수의 결과는 전동기와 인버터에 영향을 미칠 수 있다.

전동기 권선 절연레벨이 낮을 때, 높은 피크전압과 빠른 전압상승시간에 의해 생겨난 고장 확률은 높다. 전압반사는 전동기 용량, 여러 가변속 구동장치와 상승시간에 대해 계산하였으며 이를 도식적으로 나타내었다. 인버터 구동 교류 전동기 시스템에서 전동기 단자 과전압과 전압상승률을 줄이기 위한 필터효과도 언급하였다.

연구결과 전동기 용량과 전동기 절연정격, 레벨이 낮을수록 그리고 스위칭 시간과 케이블 길이가 짧을수록 절연 파괴의 가능성이 높아짐을 알 수 있었다.

Abstract

In this paper the problems associated with the switching surge of PWM inverter devices were analysed. As the application of ASD for efficient speed control of AC motors is increased, so is the motor and ASD-related failure increased. In the industrial motor applications, the introduction of PWM drives can sometimes cause insulation breakdown between the phase windings due to high transient voltage peak.

The motor cable length combined with the high switching frequency becomes more sensitive issue for proper drive operation. Effects of the cable length and high switching frequency influence both on motor and inverter.

When the insulation level of motor winding is low, the failure probability caused by high peak voltage and fast voltage rise times(dv/dt) is high. Voltage reflections are simulated for motor capacities, ASD and rise times and are presented graphically. The filtering techniques are discussed to reduce the motor terminal overvoltage and dv/dt in inverter fed AC motor drive systems.

We confirmed that the lower motor capacity and motor insulation level, the shorter switching time and cable length and the higher the probability of insulation breakdown.

*종신회원 : 원주대학 전기과 조교수
접수일자 : 1998. 11. 12

1. 서 론

가변속 구동장치(Adjustable Speed Drive; ASD)를 채용한 전동기 구동시스템은 산업 현장에서 에너지 저감을 위해 점차적으로 증가되고 있다.

그러나 부하의 효율적인 관리를 위한 가변속 구동 장치의 적용은 드라이브 장치와 전동기에 관련된 문제를 정확히 파악하지 못하여 고장 발생이 많았다 [1,2].

실제 교류 전동기의 수명은 온도, 반복동작(duty cycling) 등의 환경조건과 정상운전으로 접어드는 과도에서 문제가 될 수 있다. 특히 가변속 제어 성능 향상을 위해 스위칭 주파수가 높은 소자를 사용할 경우 발생하는 서지가 권선에 침입할 경우 절연내력을 파괴하여 전동기 고장뿐만 아니라 생산라인을 정지하는 결과를 낳을 수 있다[1,2].

인버터 스위칭에 의해 전동기에 미치는 서지의 영향은 전동기 절연등급, 가변속 구동장치와 전동기사이 케이블 길이, 스위칭 소자의 종류, 구동상태 등에 따라 달라진다. 특히 전동기와 가변속 구동장치의 길이가 길 때 케이블과 전동기 서지 임피던스의 상호관계로 전동기 단자에서 전압확대가 발생하며, 가변속 구동장치의 직류 버스전압의 2배까지 도달할 수 있다 [2].

가변속 구동장치를 사용하는 교류 전동기의 절연 시스템에서 전동기 입구단의 전압상승은 전동기 절연에 나쁜 영향을 줄 수 있는 요소들 중의 하나이다 [2,3].

그래서 본 연구는 가변속 구동장치의 스위칭 소자로부터 발생하는 스위칭 서지가 전동기에 미치는 영향을 전동기 용량별로 케이블 길이에 따라 해석하고, 그 영향을 줄이기 위해 어떤 보호장치를 선정하는 것이 적당한지를 밝히고자 한다.

2. 가변속 구동 시스템에 전송선 파동 이론의 적용

전기도체에서의 전자 파동 현상은 물결과와 같이 파동이 원점에서 멀어짐에 따라 크기가 작아져 가라앉고 파동의 이동에 장애가 있으면 반사된다. 따라서 전송선에서 전자파동이 이동할 때 지정된 점에서의

파동의 크기는 그 점에서의 입사와 반사된 파동의 합이 된다.

인버터 출력단과 전동기사이에서 케이블은 모든 드라이브의 필수적인 요소이다. 이 연결 케이블의 길이가 짧을 경우 집중정수회로로 표현 하지만 계산의 정도를 높이기 위해서는 분포정수회로를 사용한다[4]. 케이블 서지 임피던스(Z_c)는 식(1)과 같고 그 값은 수십[Ω]정도다[5].

$$Z_c = \sqrt{\frac{L_o}{C_o}} \quad (1)$$

전동기의 서지 임피던스(Z_m)는 식(2)와 같이 고정자 권선의 커패시턴스 C_m 과 전동기의 전체 인덕턴스 L_m 의 함수로 표현된다. 전동기의 서지 임피던스 값은 수백에서 수천[Ω]정도다[5].

$$Z_m = \sqrt{\frac{L_m}{C_m}} \quad (2)$$

수십[Ω]정도인 케이블에 비해 전동기의 서지 임피던스는 수백~수천[Ω]으로 상대적으로 높은 값을 가지므로 전동기 단자에서는 케이블과 전동기의 임피던스 차로 인해 구동장치로부터 발생한 전압이 전동기에 전달될 경우 서지는 반사를 일으킨다[4,5]. 이 입사파에 대한 반사파의 정도를 나타내는 반사계수(ρ)는 식(3)과 같다.

$$\rho = \frac{Z_m - Z_c}{Z_m + Z_c} \quad (3)$$

그림1은 전동기 용량에 따른 전동기와 케이블의 임피던스 및 반사계수(ρ)의 상호관계를 나타낸 것으로서 전동기 용량 증가에 따라 케이블 서지 임피던스 값은 변화가 거의 없으나, 전동기의 서지 임피던스는 상대적으로 낮다. 이는 소형전동기의 서지 임피던스가 빈약한 슬롯 절연으로 인해 중·대형 전동기에 비해 상대적으로 높기 때문이다. 따라서 소형전동기 일수록 반사계수가 높아 전압반사의 영향이 크다[1,2,4,5].

반사현상은 전동기와 가변속 구동장치사이 거리에 관계없이 발생한다.

케이블에서 파주장의 전파속도는 식(4)와 같이 인덕턴스와 커패시턴스에 의해 정해진다. 케이블의 비유전율(ϵ_r)이 3~8 일 경우 전파속도는 100~150[m/μs]가 된다[4,5,6].

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_o C_o}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_o \epsilon_o \epsilon_r}} \quad [m/\mu s] \quad (4)$$

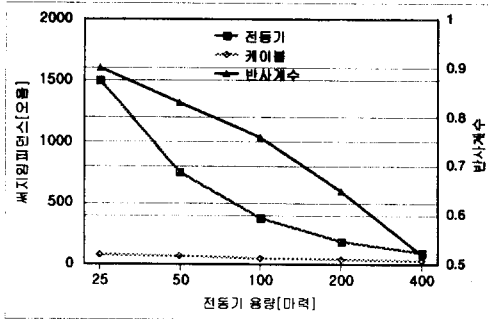


그림 1. 전동기용량 대 서지임피던스 및 반사계수
Fig. 1. Surge Impedance and Reflection Coefficient vs Motor Capacity

전송선의 위치에 따른 전압의 크기는 종점으로부터 거리 x 의 함수이다.

입사와 반사파 합의 크기가 입사파의 피크값 보다 크게 되는 임계 길이를 계산하기 위해서는 전송선에서 전자파의 파동속도를 알아야 한다. 파동의 전파속도가 v 이고 가변속 구동장치의 출력단에서 PWM 파두장의 상승시간이 t_r 일 경우, 파두장 까지 길이 (l)는 $v \times t_r$ 이다.

입사파가 전체값의 50%에 도달하는 위치가 만일 종단점일 경우와 전반사를 고려할 경우, 입사와 반사된 파동의 합은 입사파 피크값의 100%가 된다. 이때의 길이를 임계길이(l_{cr})라 한다[6]. 이와 같은 전압상승이 일어나는 전동기 케이블의 임계길이는 식(5)와 같다.

$$l_{cr} = \frac{v \times t_r}{2} \quad (5)$$

가변속 구동장치의 전압 상승시간이 0.4~0.6[μs]일 경우 임계길이는 식(5)에 의해 알 수 있듯이 30~45[m]로서 이 이하에서 사용하는 것이 바람직하다. 그러나 스위칭속도가 빠른 소자의 경우 전압상승시간은 점차 빨라지게 되므로 임계길이는 더욱 줄어든다.

그림2는 대표적인 인버터 스위칭 소자의 펄스 전압 상승시간 ($\tau = 0.1 \sim 5.0[\mu s]$)에 대한 임계 케이블 길이를 식(5)로 나타낸 것으로서, 스위칭 시간에 따라 오른쪽부분은 안전한 적용영역을 나타내지만 왼쪽영역에서는 반사의 영향으로 부하측에 미치는 영향이 커질 수 있음을 나타내고 있다.

인버터 스위칭시간이 짧을수록 인버터에서 전동기 사이 케이블 길이는 짧아야 하나 스위칭속도가 다소

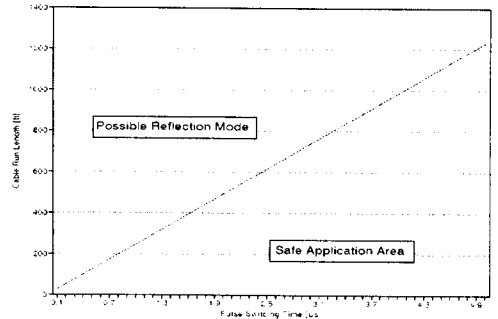


그림 2. 펄스 스위칭상승시간 대 임계 케이블 사용 길이
Fig. 2. Critical Cable Run Length vs Pulse Switching Time

낮은 GTO와 같은 소자를 사용할 경우 케이블 길이는 다소 길어도 된다.

실제 가변속 구동장치로부터 전동기까지의 케이블 길이가 길어질 경우 커패시턴스의 증가로 서지 임피던스는 점차 줄어들어 식(3)에서 알 수 있듯이 반사계수의 증가로 부하측에 나타나는 영향은 점차 커지게 된다. 따라서 케이블의 길이가 길 경우 반사된 전압이 중첩되는 현상이 일어날 수 있으며 빠른 상승비일 경우 짧은 케이블 길이에서도 반사된 파동이 형성될 수 있다.

3. 스위칭 장치와 전동기 절연전압정격

교류 전동기 운전에서 사용되는 가변속 구동장치의 스위칭 형태 선택과 이에 맞는 전동기의 절연레벨 명시는 설비를 안전하게 운전하기 위한 시스템 설계시 매우 중요하다.

전동기 전원 개폐시 전압 스파이크가 발생할 수 있다. 이 전압 스파이크는 전동기 입구단에서 역으로 반사되는 높은 주파수 성분을 포함하며 주파수가 높을수록 더 많은 에너지가 반사된다. 주파수 성분이 클수록 앞 모서리(leading edge)가 커지는 반사가 일어나며 이런 현상에서 전압상승비(dv/dt)가 빠를수록 반사된 에너지는 많아진다[4].

가변속 구동장치의 스위칭시 짧은 펄스의 높은 전압이 발생하며 이 파형의 각 펄스 팁(tip)내 저장된 에너지는 전동기 절연에 전기적 스트레스로 작용된다. 전원으로부터 발생한 전진(forward) 펄스는 전동기로 이동함에 따라 에너지 레벨을 증가시키며, 반사된 펄

스로 추가된 양만큼 증가한다.

3.1 가변속 가변속 구동장치에 사용되는 스위칭 장치특성

최근에는 스위칭시간이 0.1 μ s나 이 이하인 전력반도체 소자가 개발되어 매우 짧은 시간에 출력전압이 피크까지 도달할 수 있지만 정현파 전원으로 구동하는 대부분의 전동기는 이와 같은 조건에서 동작할 수 있는 충분한 절연설계가 고려되어 있지 않다.

PWM인버터 회로에 사용되는 트랜지스터나 IGBT는 0.1 μ s이하, GTO는 2~10 μ s PWM이 아닌 구형파 인버터나 전류형 인버터의 경우는 5 μ s 이상의 상승시간을 가진 펄스를 발생시킨다[3].

IGBT가 가장 많이 사용되는 이유는 빠른 스위칭 시간 과 낮은 장치 전도손실을 발생하며 효율이 높기 때문이다. 빠른 스위칭 시간은 구동 반송주파수를 가칭범위 이상으로 높이는 것도 가능하다.

표1에서 제어스위칭 소자의 상대적인 성질을 나타낸 것이다[3,7]. IGBT의 경우 전류용량은 낮지만 주파수는 상대적으로 높고, GTO의 경우 주파수는 낮지만 전류용량이 상대적으로 높은 특성을 가지고 있다.

표 1. 제어 스위치의 상대적인 성질
Table 1. Relative Properties of Controllable Switches

Device	Power Capability	Maximum voltage rise time	Switching Speed
BJT	Medium	1500/4.0 μ s	Medium
GTO	High	3000/1.0 μ s	Slow
IGBT	Medium	2000/0.1~0.2 μ s	Medium

선택된 스위칭 소자에 따라 dv/dt가 결정되고 dv/dt가 빠를수록 반사된 전압과동이 최대로 나타나는 거리는 짧아진다.

3.2 전동기의 절연 레벨

저압 유도전동기의 대부분은 난권(mush or random)을 하지만, 중·대형에서는 형권(formed winding)을 사용한다. 소형의 경우 코일을 고정자에 삽입하는 과정에서 코일내 첫 번째와 마지막 턴은 고정자 슬롯에서 서로 인접하게 교차하거나 놓여질 수 있게 되어 절연에 가장 큰 스트레스를 받을 수 있다

[1,3].

대부분의 전동기 권선 고장은 상간 단락이나 각 상과 고정자 입구단 첫 번째 턴에서 일어난다[4]. 가장 높은 전압은 권선의 첫 번째 턴에서 일어나며, 권선의 커패시턴스와 인덕턴스에 의해 피크 전압과 전압상승 시간은 권선 내부로 진행됨에 따라 감소된다. 일반적으로 한 권선이 여러 턴으로 이루어져 있기 때문에 전동기에서 턴간 전압은 아주 낮다. 하지만 전압상승비가 매우 높을 때는 턴 사이와 상권선 사이 전압 구배가 지나칠 정도로 높게 되어 전동기 절연을 파괴하게 되어 결국에는 고장의 원인이 된다. 이와 같은 현상은 피크 단자전압이 전동기의 절연내력을 초과하기 때문에 일어나므로 480 또는 600V 전동기에서 일어나기 쉽다[2].

교류 전동기 절연방법과 형태는 전동기에 따라 다르지만 다용도 NEMA에서 규정한 전동기는 600V AC에서 동작하는 것들을 나타내고 있다.

소형 전동기가 대형 전동기보다 제작과정에서 고장 원인이 많이 제공될 수 있기 때문에 가변속 운전시 고장 발생 확률이 높다. 그래서 소형을 위주로 스위칭 형태에 따라 나타내는 현상을 분석하는 것이 매우 중요하다. 대부분의 전동기는 연속 운전에서의 절연내력을 2 \times 실효치[V]+1000 로 정의하고 있다[2,8].

표2는 일반 유도전동기와 가변속 유도전동기에 대한 절연수준에 따른 피크전압의 크기와 전압 상승률을 명시한 NEMA 규정이다[8].

표 2. 최대 전압스트레스 레벨
Table 2. Maximum voltage stress level

구분	NEMA MG1-Part 30			NEMA MG1-Part 31		
	V _{peak}	rise time(μ s)	dv/dt (v/ μ s)	V _{peak}	rise time(μ s)	dv/dt (v/ μ s)
600V 이하	$\leq 1kV$	≥ 2	500	$\leq 1.6kV$	≥ 0.1	16,000
600V 이상	$\leq 2.5pu$	≥ 1		$\leq 2.5pu$	≥ 0.1	

3.3 보호장치의 특성

PWM형 인버터의 스위칭 서지전압의 크기가 식(6)이 되므로 가변속 가변속 구동장치로부터 전동기까지 적정 케이블 길이를 초과할 경우 스위칭 서지의 전도 현상이 전동기 절연에 영향을 줄 수 있다.

여기서 I_{pu} 는 선간전압의 $\sqrt{2/3}$ 이다.

$$V_{peak} = V_{dclink} = 3 \frac{\sqrt{2}}{\pi} V_{선표치} \quad (6)$$

그래서 인버터 출력의 직류링크 전압은 상전압 실험치의 200% 이하가 되게 하고, 200% 이상일 경우 높은 절연 수준의 전동기를 사용하도록 권고한다[6].

임계 케이블 길이는 전동기 고장이 이 길이를 초과할 경우 일어난다는 것을 의미하는 것보다는 전동기 피크 전압이 DC 버스전압을 초과하기 시작하고 케이블 길이가 임계 케이블 길이를 넘어 확대됨에 따라 증가하기 시작할 경우이다. 이론적으로 전압배가가 일어날 수 있는 것처럼 실제로 전압은 DC 버스전압의 두 배를 초과할 수 있다[1,2].

가변속 구동장치로부터 공급된 전동기에 의해 만난 과전압 문제를 경감시키기 위해 3상 부하 리액터, 전동기 단자에 RC 스너브, 저역 필터부를 설치하는 것 외 절연된 필터를 사용하고 있다. 실제 가장 많이 사용되고 있는 리액터와 스너브 회로를 사용할 경우 나타나는 특성은 다음과 같다.

1) 3-Phase Reactor

전동기와 케이블의 서지 임피던스 사이 불일치가 악화될 경우 중단점에서는 높은 반사계수와 높은 전압을 초래한다.

가변속 구동장치단에 3상 부하 리액터를 추가하여 케이블의 서지 임피던스를 인위적으로 증가시킴으로써 반사계수는 낮아져 반사되는 파동장 크기를 줄인다. 전동기 쪽 도체에서 역으로 진행하는 반사된 전압은 줄어들어 케이블에서 스트레스를 줄인다.

충분한 크기(5%)의 직렬리액터는 전류제한 장치로 동작하며 dv/dt 를 낮추며 전기적인 소음을 줄이는 PWM파형을 여과한다. 단락전류를 제한함으로써 이들 리액터는 부하측에 단락회로 또는 출력전류에서 서지로부터 제어를 보호한다[8].

2) RC 스너브(단자대:Terminator)

스너브 회로망은 전압상승시간을 수 μs 까지 확장시키며 피크전압을 낮춘다.

저항과 직렬로 캐패시터를 구성하는 필터는 케이블의 서지 임피던스를 일치시키며 전동기 단자 과전압이 최소화되도록 설계해야 한다. 따라서 스너브 요소는 부하 임피던스가 전동기 케이블의 특성임피던스와

일치하도록 신중하게 선택되어야 한다. RC스너브는 채용된 모든 방법 중에서 가장 간단하고 저렴하다.

3) LC 필터

저역 LC필터는 필터부분을 형성하기 위해 부하 리액터와 캐패시터 회로망을 결합한 것이다. 이 필터는 약 1~1.5kHz의 공진 주파수를 가지며 이보다 높은 주파수는 필터에 의해 흡수되고 전동기에는 통과시키지 않는 작용을 한다. 이 방법의 장점은 전동기의 전압과 형이 거의 정현파에 가깝다는 장점이 있지만 상대적으로 가격이 다소 비싸다. 이외 절연 캐패시터를 가진 LC필터를 사용하는 방법이 있지만 이 방법도 또한 가격이 가장 비싼 단점을 지니고 있다.

4. 계산 및 결과 분석

스위칭 소자의 종류에 따라 절연 손상을 일으키지 않도록 전동기의 절연정격전압 범위에서 케이블 길이를 정하는 것은 매우 중요하다.

저압전동기의 정격전압은 대개 220V, 380V와 460V이다. 이 중에서 전동기가 가장 큰 영향을 받을 수 있는 전압정격은 460V이다. 따라서 이 전압을 기준으로 하되 380V의 정격에 대해서도 스위칭 소자의 종류에 따라 전동기에 미치는 영향을 보호장치의 부착전과 부착후의 변화를 해석하였다.

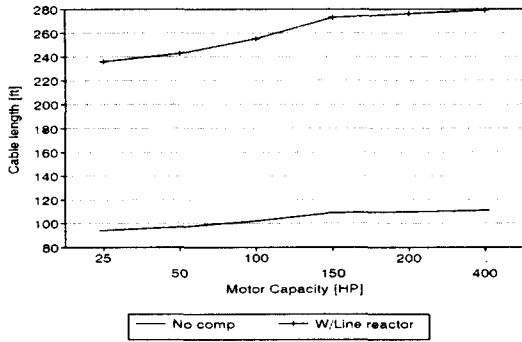
그림3에서는 공칭전압이 460V이고 전동기의 절연정격전압이 1200V 일 경우 IGBT, BJT에 대한 가변속 구동장치와 전동기의 케이블 길이를 전동기의 용량별로 나타낸 것이다.

그림3(a)의 경우 펄스의 상승시간은 0.4 μs 정도가 된다. 이는 그림2에서 제시된 펄스 스위칭시간에 대한 안정영역에 속하지 만 전동기의 용량이 100마력 이하인 경우 문제가 될 수 있다.

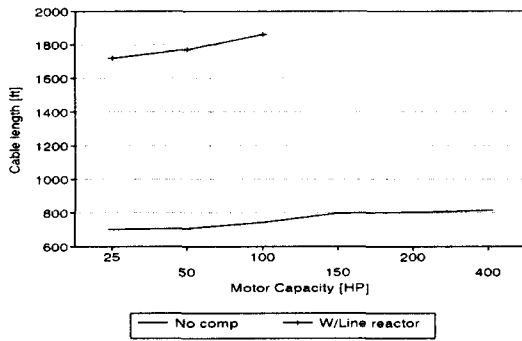
연속적으로 전동기를 운전하는 경우 정현파가 아닌 PWM과 같은 펄스파로 인한 전압스트레스를 줄이기 위해 부하측에 보호장치를 설치할 수 있다. 선로에 리액터를 부착한 후 펄스의 상승시간은 1 μs 가 되어 안정한 조건을 만족할 수 있다.

그림3(b)는 (a)보다는 스위칭 속도는 다소 느리지만 전류용량이 큰 BJT 스위칭소자이다. 이 경우 인버터로부터 전동기 단자사이 길이는 그림3(a)에 비해 상당히 큰 거리 확보가 가능함을 알 수 있다. 전파시간은 그림3(a)보다는 다소 긴 약 2.8 μs 전후가 되지만 반사

가 가능한 영역에 들어가게 된다. 그러나 펄스의 반복 회수가 점차 줄어들어 그림3(a)에 의한 것보다는 그 영향이 약화된다. 따라서 더욱 안정한 영역에 포함될 수 있도록 선로 리액터를 설치할 경우 펄스상승시간을 약 3배정도 연장할 수 있다.



(a) Switching Device IGBT



(b) Switching Device BJT

그림 3. 절연정격전압 1200 [V] 에서 스위칭소자의 임계 케이블 길이
Fig. 3. Critical Cable length of Switching Device at Insulation Rated Voltage 1200 [V]

이 그림3에서 알 수 있듯이 스위칭 주파수가 높은 소자일수록 인버터 출력측에서 전동기 단자사이 케이블 길이가 짧아짐을 알 수 있다. 그러나 선로에 리액터를 설치할 경우 선로의 임피던스값의 상승으로 반사계수는 감소된다. 이 결과 케이블 길이는 약 2배 이상이 되어 전파시간이 2배 이상 연장된다.

그림3에서 알 수 있듯이 BJT 스위칭소자로 한 인

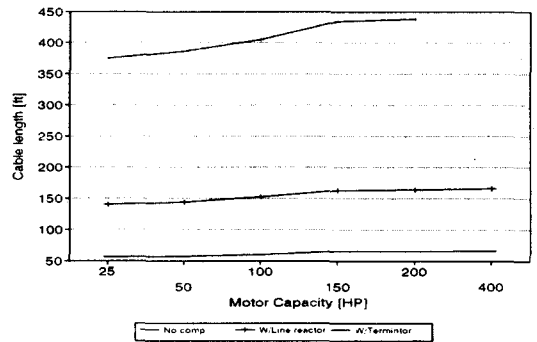
버터로 제어하는 1200V 정격 전동기는 케이블 길이를 연장할 수 있으나 펄스 상승시간의 늦음으로 인해 반사의 영향을 받을 수 있다는 것과 IGBT를 스위칭소자를 사용한 경우에는 전동기의 용량이 작을 경우 인버터 출력단 또는 전동기 입구단에 보호장치를 설치하여야만 전압스트레스를 줄일 수 있다.

GTO를 스위칭소자로 사용한 인버터 출력단에서 전동기까지의 길이는 별도의 보호방안을 마련하지 않고도 4 μ s의 전파시간에서 61[m]가 넘어도 정격기준에서 절연이 문제가 되지 않아 계산하지 않았다.

그림4는 공칭전압이 460V이고 전동기 절연정격이 1000V인 경우의 해석결과를 나타낸 것이다. 이때 인버터 출력측 전압의 크기는 식(6)에서 계산한 값의 2배가되어야 하나 전동기의 전압절연정격이 약 80%로 줄어들게 되므로 인버터 출력측 출력전압은 2배가되는 값을 160%로 계산한다.

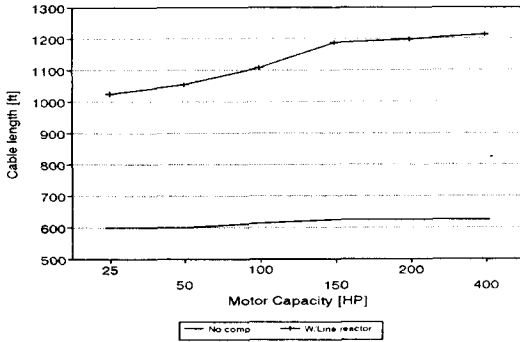
그림4(a)에서는 IGBT 소자를 사용한 경우 케이블 길이 변화를 나타낸 것이다. 아무런 보호대책이 없는 경우 길이는 절연정격이 다소 높은 그림3에 비해 거리가 약 1/2 정도로 짧아짐을 알 수 있다. 그러나 보호장치의 부착에 따라서는 케이블 길이를 점차 확대할 수 있다.

인버터 부하측 또는 전동기 입구단에 리액터를 부착할 경우 길이는 3배정도로 늘릴 수 있으며 전동기 입구단에 단자대(Terminator)를 설치할 경우 거의 8배로 길이를 증가시킬 수 있다. 이때의 펄스의 상승시간을 계산하면 0.2 μ s에서 0.6와 1.6 μ s로 점차 확대된다.

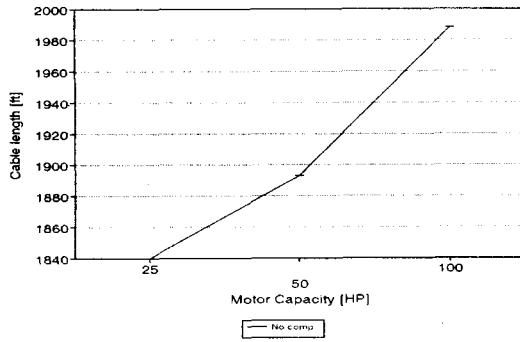


(a) Switching Device IGBT

인버터 스위칭전압 파형에 의한 전동기 권선 영향 해석



(b) Switching Device BJT



(c) Switching Device GTO

그림 4. 절연정격전압 1000 [V] 에서 스위칭소자의 임계 케이블 길이
Fig. 4. Critical Cable length of Switching Device at Insulation Rated Voltage 1000 [V]

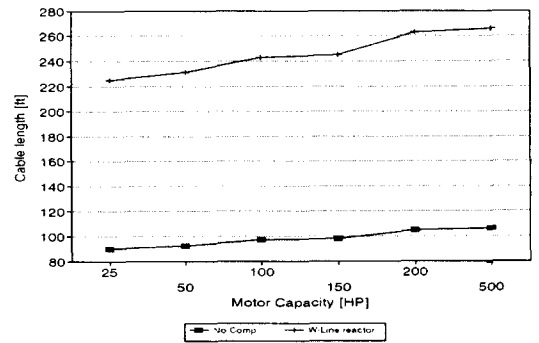
이와 같은 현상은 전동기의 정격전압에 대한 절연 정격전압이 낮기 때문에 인버터 출력단에서 발생하는 펄스전압의 상당한 부분이 전동기에 전달될 경우 권선이 받는 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

그림4(b)에서는 BJT를 스위칭 소자로 사용한 경우 전동기 용량별로 계산한 결과이다. 스위칭속도가 그림 4(a)보다 낮기 때문에 길이는 점차 길게 할 수 있다. 인버터 출력단과 전동기 입구단에 리액터를 부착한 후 길이의 변화는 거의 2배가되며 이때의 펄스의 상승시간은 4 μ s가 된다. 리액터를 부착하는 것으로 상승시간의 4 μ s이상 연장이 가능하므로 단자대를 별도로 부착할 필요가 없다.

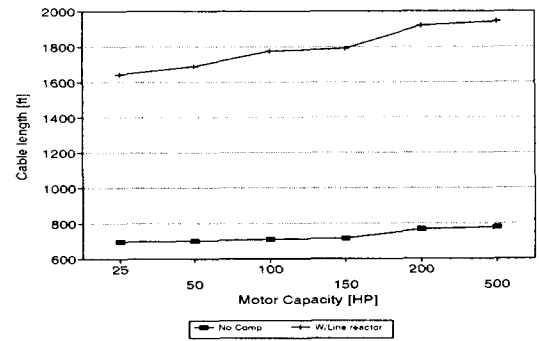
그림4(c)는 (a)와 (b)에 비해 전류 정격은 크지만 스

위칭 속도가 낮은 GTO소자의 경우 케이블 길이 변화를 나타낸 것으로서 거의 8 μ s까지 연장이 가능하다. 따라서 보호대책이 필요하지 않다.

그림5는 시스템의 공칭전압이 380V이고 전동기 전압절연정격이 1000V 일 경우 스위칭 소자별로 전동기의 절연을 손상시키지 않는 범위에서 케이블 길이의 변화를 나타낸 것이다.



(a) Switching Device IGBT



(b) Switching Device BJT

그림 5. 절연정격전압 1000 [V] 에서 스위칭소자의 임계 케이블 길이
Fig. 5. Critical Cable length of Switching Device at Insulation Rated Voltage 1000 [V]

그림5(a)는 IGBT 스위칭소자를 채용한 경우 인버터와 전동기사이 적정 길이를 나타낸 것으로 상당히 짧아짐을 알 수 있다. 이때의 펄스의 상승시간은 0.4 μ s정도가 된다. 그러나 공칭전압이 460V이고 전동기 전압절연정격이 1000V인 그림4(a)에 비해 길이는 약간 증가한다. 인버터의 출력단 또는 전동기 입구단에

리액터를 설치할 경우 펄스의 상승시간은 $1.0\mu s$ 정도로 되고, 스너버 회로를 전동기 입구단에 설치하면 상승시간을 $8\mu s$ 이상 늦어진다.

그림5(b)는 (a)와 같은 조건하에서 BJT를 스위칭 소자로 한 경우 인버터 출력단에서 전동기 사이 거리의 변화를 나타낸 것이다. 별도의 보호대책이 마련되지 않아도 펄스의 상승시간을 $2.8\mu s$ 정도가 될 수 있으며 리액터를 인버터 출력단 또는 전동기 입구단에 설치하면 상승시간을 $7\mu s$ 전후로 연장이 가능하다.

5. 결 론

PWM인버터 가변속 구동장치의 스위칭소자에 따른 전압상승시간과 펄스 파형이 다름을 해석하였다. 그리고 이들 파형이 전동기에 전달되면 높은 전기적 스트레스로 작용할 수 있음을 확인하였다.

그리고 전동기의 절연전압정격별로 각 스위칭 소자에 대한 케이블 길이를 계산한 결과 스위칭소자의 주파수가 높을수록 인버터에서 전동기에 이르는 펄스의 전파시간이 짧아져 절연손상의 가능성은 높고, 소자의 스위칭 주파수가 낮을 경우 케이블 길이는 더욱 길게 하여야만 인버터에서 발생한 급준파 펄스의 영향이 완화될 수 있음을 분석 제시했다.

또한 전동기의 절연정격이 높게 설계되면 인버터에서 발생한 전압의 거의 두 배 정도에 견딜 수 있지만, 전동기의 공칭전압에 비해 절연정격전압이 낮게 설계되면 스위칭 주파수가 높은 소자사용시 발생하는 빠른 전압상승비(dv/dt)를 가진 파형이 전동기에 전파되어 절연 문제를 일으킬 수 있다.

그래서 실제 인버터에서 전동기 사이의 길이가 짧거나 인버터의 스위칭 주파수가 높으면 인버터 출력측이나 전동기 입구단에 리액터를 설치하거나 전동기 입구단에 단자대를 설치함으로써 인버터 스위칭으로 발생하는 펄스의 전파시간을 상당히 완화시킬 수 있음을 시뮬레이션으로 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] 김종겸외 4인, "인버터 스위칭에 의한 전동기 권선의 전압 스트레스 해석", 대한전기학회 논문지, 46권, 6호, pp.869-874, 1997, 6
- [2] Austin H. Bonnet, "Analysis of the Impact of pulse-Width Modulated Inverter Voltage Waveforms on AC Induction Motors", IEEE Trans on IAS, Vol.32., No.2, pp.386-392, 1996 Mar/Apr
- [3] Erik Persson, "Transient Effects in Application of PWM Inverter to Induction Motors", IEEE Trans on IAS, Vol.28, No.5, pp.1095-1101, 1992, Sep/Oct
- [4] 이은용, 김종겸, "급준파 개폐 써지가 유도전동기의 고정자 권선에 미치는 전기적인 스트레스 해석", 대한전기학회 논문지, 44권, 8호, pp.994-1000, 1995.8
- [5] 김종겸, 이은용, "진행파에 의한 스위칭 써지전압 해석", 대한전기학회 논문지, 43권, 8호, pp.1252-1258, 1994.8
- [6] John M. Bently & Patrick J. Link, "Evaluation of Motor Power Cables for PWM AC Motors", IEEE Trans on IAS, Vol.33, No.2, pp.342-358, 1997, 3/4
- [7] Ned Mohan et al, Power Electronics, John Wiley & Sons, 1997, pp.29-30.
- [8] NEMA-Part 30, 31,

◇ 저자 소개 ◇

김종겸(金宗謙)

1961년 10월 3일생. 1984년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 충남대 공대 전기공학과 졸업, 1996년 2월 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1987년~88년 한국통신공사 근무, 1988년~96년 한국수자원공사 근무, 1996년~현재 국립원주대학 전기과 조교수