

인버터 구동 유도전동기에서 과도전압의 측정과 분석

Measurement and Analysis of Transient Overvoltages on Inverter-fed Induction Motors

박대원*, 김일권*, 최수연**, 박찬용**, 길경석[§]

Dae-Won Park*, Il-Kwon Kim*, Su-Yeon Choi**, Chan-Yong Park**, Gyung-Suk Kil[§]

ABSTRACT

Induction motors are the main driving force of electric vehicles and operated by pulse width modulation (PWM) inverters in speed control. Contrary to full-voltage operation of induction motors, inverter-fed induction motors (IFM) generates transient overvoltages up to 10 kV/us and transient overvoltages accelerate the deterioration of winding insulation. We investigated transient overvoltages produced by the operation of IFM and analyzed its peak value and dv/dt depending on power cable length and operation frequency. The experimental results showed that transient overvoltages measured at the motor terminal increased with the cable length between inverter and motor.

1. 서론

유도전동기는 산업전반에 광범위하게 사용되는 주요 동력원으로 특히 전기철도나 전기자동차에서 사용되는 유도전동기는 빈번한 기동과 정지, 진동과 같은 열악한 환경조건하에 있다. 전기차량에서 유도전동기는 원활한 속도제어를 위해 가변속 제어를 이용하고 있으며 최근 마이크로 프로세서 및 PWM(Pulse Width Modulation) 제어기술의 발달로 가변속제어 시스템의 응용분야가 크게 확대되고 있다. 또한 전력용 반도체 소자의 발달로 고속 스위칭이 가능한 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor), FET(Field Effect Transistor)등의 소자가 개발되면서 유도전동기의 가변속 제어에 사용되는 PWM 인버터의 성능이 크게 향상되었다. 그러나 PWM 인버터의 사용으로 고속 스위칭 동작에 의한 과도전압의 문제가 발생하고 있으며 600 V이하 저압 유도전동기의 운전시에도 μs 이하의 상승시간당 최고 수 천V의 과도전압이 발생할 수 있다^[1~3]. 이러한 과도전압이 유도전동기 입력단자에 그대로 전달될 경우 전동기 절연에 스트레스를 주게 되어 절연의 조기열화를 초래하며 전동기 권선에 불규칙적인 전압분포를 야기시켜 최종적으로 유도전동기의 절연파괴를 초래한다^[4~7]. 과도전압의 크기는 사용하는 PWM 인버터의 종류와 운전 및 설치조건에 따라 유도전동기의 입력단자에 다르게 나타날 수 있기 때문에 이에대한 정확한 측정과 분석은 유도전동기 절연성능 및 수명예측을 위해 매우 중요하다. 본 논문에서는 인버터 구동용 유도전동기의 절연설계에 대한 기준과 절연성능평가를 위해 유도전동기의 인버터 구동시 발생하는 과도전압을 측정하였으며 접속 케이블의 길이에 따른 과도전압의 크기와 시간변화율, 운전주파수에 대한 영향을 분석하였다.

* 한국해양대학교 대학원 박사과정, 정회원

E-mail : dwpark77@hhu.ac.kr

TEL : (051)410-4893 FAX : (051)403-1127

** 한국해양대학교 대학원 석사과정, 정회원

[§] 한국해양대학교 전기전자공학부 교수, 정회원

2. 이론

2.1 과도전압의 발생

전력용 반도체의 급격한 발달로 고속 스위칭이 가능해짐에 따라 PWM 인버터의 성능이 크게 향상되었으나 상용주파수 전압을 이용한 운전과는 달리 PWM 인버터 구동시에는 기존과는 다른 형태의 전압이 인가되어 유도전동기에서 부담해야하는 여러 가지 문제점이 나타나고 있다. 일반적으로 사용되는 PWM 인버터의 유도전동기 구동 시스템을 그림 1에 나타내었다.

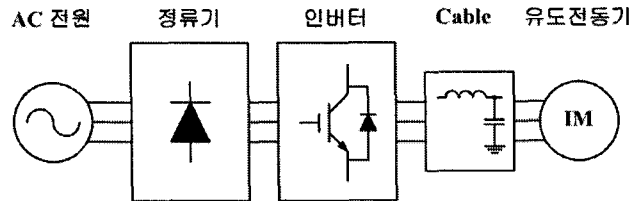
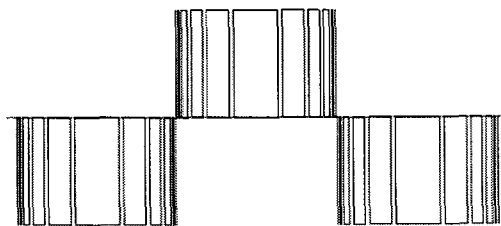
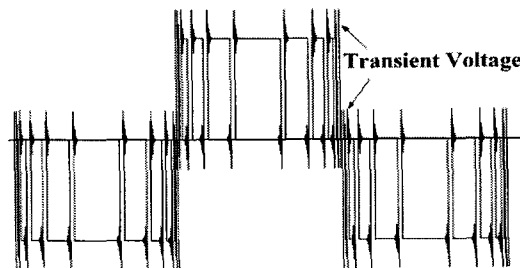


그림 1 유도전동기 구동용 인버터 시스템의 구성

PWM 인버터는 펄스형태의 전압을 출력하기 때문에 기본성분 이외에 스위칭 동작에 의한 많은 고조파성분이 포함되어 손실이나 잡음 등을 유발한다. 그림 2에 PWM 인버터 구동시 인버터 출력단자 및 전동기 입력단자에서의 전압 파형을 나타내었다. 인버터 출력전압은 그림 2(a)와 같이 거의 구형파에 가깝지만, 전동기 입력단자에서의 전압 파형은 그림 2(b)와 같이 고속 스위칭 동작으로 인해 과도전압이 발생하며 유도전동기의 운전동안 지속적으로 발생하여 전동기 절연에 영향을 미칠 수 있다.



(a) 인버터 출력전압



(b) 유도전동기 입력전압

그림 2 PWM 인버터 구동전압의 예

2.2 진행과 이론

PWM 인버터에 의해 발생하는 과도전압은 진행파로서 케이블을 통해 유도전동기의 입력단자로 전달된다. 인버터의 출력단자와 케이블, 선로와 유도전동기의 입력단자 사이에는 임피던스 불연속점이 존재

하며 인버터의 전압이 전동기 입력단에 인가되면 임피던스 불연속점에서 반사를 일으켜 인버터 출력전압과 중첩되게 된다. 임피던스 부정합에 의한 전압의 반사는 케이블의 길이가 길 경우 전압분포의 불평형을 유발하고 특히 전동기 입력단자에서의 입사전압과 반사전압의 중첩은 전동기 권선의 손상을 발생시킨다. 그림 3과 같이 케이블의 특성임피던스를 Z_C , 전동기의 임피던스를 Z_M , 입력전압이 라고 하면 전동기 입력단자에서 발생하는 반사전압은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. E

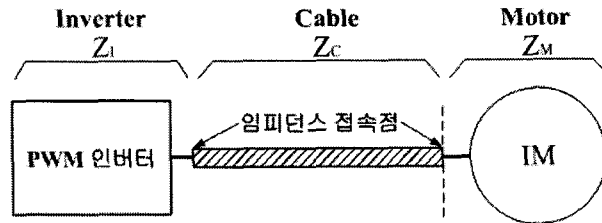


그림 3 접속점에서의 임피던스

$$E_M' = \frac{Z_M - Z_C}{Z_M + Z_C} \times E \quad (1)$$

여기서, 전동기 입력단의 반사계수를 Γ_M 이라고 하면

$$\Gamma_M = \frac{Z_M - Z_C}{Z_M + Z_C} \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다. 일반적으로 케이블은 50 ~ 200 Ω정도의 특성 임피던스를 가지며 전동기의 특성 임피던스는 용량에 따라 달라지지만 일반적으로 수 ~ 수 십 kΩ정도로 알려져 있다. 그리고 인버터 출력단자의 임피던스는 극히 작으므로 $Z_I \ll Z_C \ll Z_M$ 의 관계가 성립한다. 따라서 전동기의 임피던스는 케이블의 임피던스보다 크므로 반사계수 $\Gamma_M = 1$ 이 되어 전동기 입력단자의 접속점에서 E_M' 의 반사파가 생기며 인버터 출력전압 E 와 중첩되어 전동기의 절연성능을 위협하게 된다.

3. 측정 및 분석

과도전압은 고속 스위칭동작 및 임피던스 부정합에 의해 발생하기 때문에 인버터에서 전동기까지의 거리는 가능한 짧게 하도록 권장하고 있다. 그러나 설치환경 및 조건에 따라 인버터 출력단자에서 전동기 입력단자까지의 거리는 수 m에서 수 십 m에 이르는 경우가 많으므로 케이블의 임피던스가 달라진다. 따라서 유도전동기의 입력전압은 케이블과 전동기사이의 임피던스에 따라 달라지므로 케이블의 거리에 따른 과도전압을 측정, 분석하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 3상 5마력 유도전동기의 인버터 구동시 케이블의 길이 및 운전주파수에 따라 발생하는 과도전압을 측정하였다. 길이에 따른 과도전압을 측정하기 위해 10m, 25m 케이블을 사용하였으며 인버터의 운전주파수는 10 Hz~150 Hz로 가변하면서 유도전동기에 인가되는 과도전압을 측정하였다. 측정 시스템의 구성은 그림 4와 같으며 케이블의 길이에 따른 과도전압의 측정결과를 그림 5에 나타내었다.

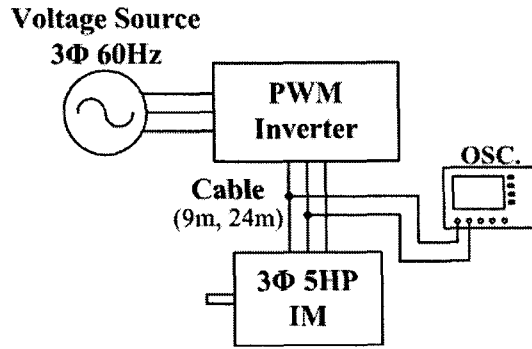
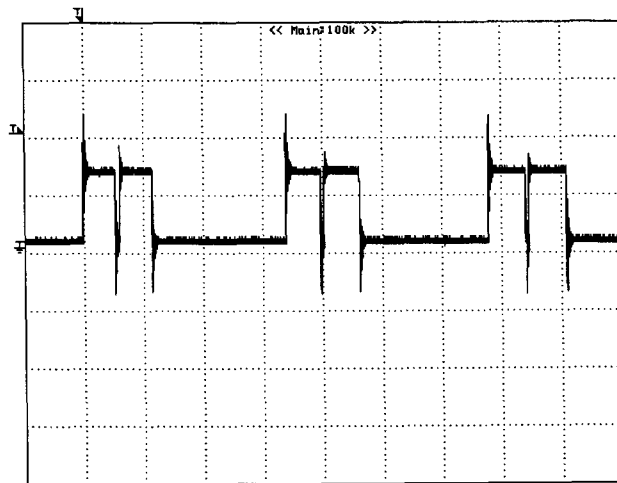
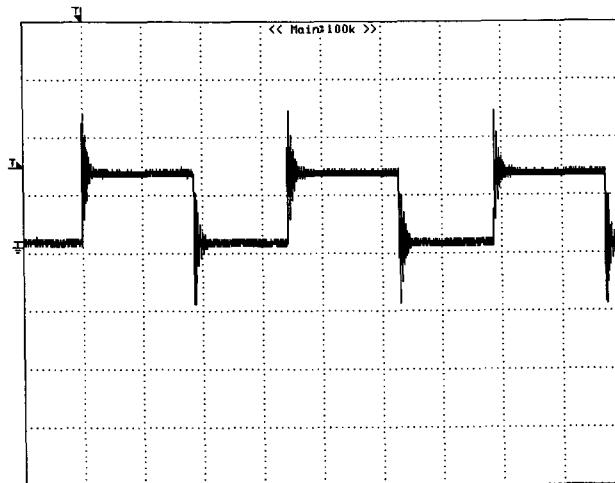


그림 4 실험장치의 구성



[500V/div, 20 μ s/div]

(a) 10[m] 케이블



[500V/div, 20 μ s/div]

(b) 25[m] 케이블

그림 5 케이블 길이에 따른 과도전압의 파형

인버터의 운전주파수를 53 Hz로 고정하고 케이블의 길이에 따른 과도전압의 측정결과 케이블 길이를 증가시킬 경우 10 m에서 전동기 입력단자에서 측정된 과도전압은 최대값이 1.1 kV, 상승시간이 70 ns로 측정되었으며, 25 m에서는 최대값 1.6 kV, 상승시간 54 ns로 측정되었다. 인버터에서 전동기까지의 케이

블의 길이가 길어질수록 전동기에 나타나는 과도전압의 크기는 증가하였다. 따라서 인버터와 전동기 사이 케이블 길이를 선정할 경우에는 과도전압에 대한 대책마련이 필요하며, 전기차량에서는 기동과 정지를 위해 운전주파수를 가변하므로 이로 인한 과도전압의 크기를 파악하는 것이 중요하다.

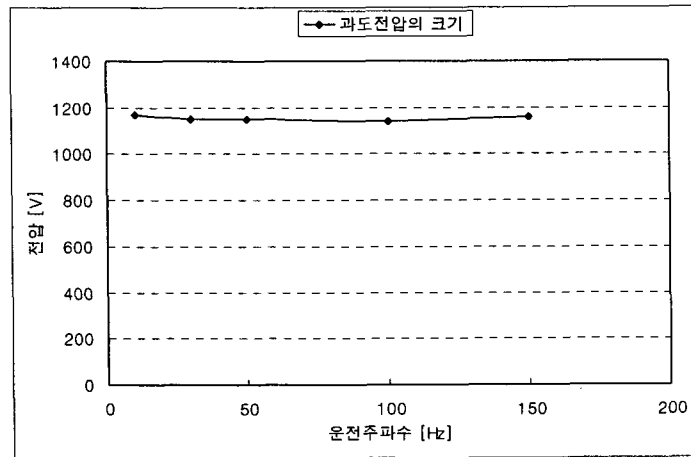


그림 6 운전주파수에 따른 과도전압의 크기

그림 6은 케이블 길이는 25 m로 하고, 운전주파수를 30 Hz, 50 Hz, 100 Hz 및 150 Hz로 한 경우 전동기 단자에 나타나는 전압 파형이다. 전동기의 가변속 운전주파수 변화시 전동기 입력단자에 나타나는 과도전압의 최대값은 1.14 kV~1.17 kV로서 케이블 길이에 대한 영향에 비해 크게 변화가 없었다. 따라서 운전주파수의 변화는 전동기의 입력단자에 나타나는 과도전압의 크기에 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서는 인버터 구동용 유도전동기의 절연설계에 대한 기준과 절연성능평가에 적용하기 위해 유도전동기의 인버터 구동시 발생하는 과도전압을 측정하였으며 접속 케이블의 길이에 따른 과도전압의 크기와 시간변화율, 운전주파수에 대한 영향을 분석하였다. 케이블 길이에 따른 영향을 분석하기 위해 10 m와 25 m 케이블을 사용하였으며 10 m 케이블에서는 최대값 1.1 kV, 상승시간 70 ns의 과도전압이 측정되었으며 25 m에서는 최대값 1.6 kV, 상승시간 54 ns로 측정되었다. 또한 운전주파수와 과도전압발생의 관계를 분석하기 위해 10 Hz~150 Hz로 운전주파수를 가변하며 과도전압을 측정하였으며 운전주파수에 따른 영향은 케이블의 길이에 따른 영향과 비교해 과도전압의 크기에는 영향을 주지 않음을 확인하였다. 실험결과, 유도전동기에서 측정된 과도전압은 유도전동기의 절연설계나 서지시험과 같은 성능평가에 중요한 자료로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 교통체계 효율화사업의 연구결과로 수행되었음.

- [1] H.A. Toliyat, G. Suresh, A. Abur, "Simulation of Voltage Stress on the Inverter Fed Induction Motor Winding Supplied Through Feeder Cable", Industry Application Conference, Thirty-Second IAS Annual Meeting, IAS '97, Vol. 1, pp.143-150, 1997.
- [2] L. Gubbala, A. Von Jouanne, P.N Enjeti, C. Singh, H.A Toliyat, "Voltage Distribution in the Windings of an AC Motor Subjected to High dv/dt PWM Voltages", Power Electronics Specialists Conference, 1995. PESC '95, 26th Annual IEEE, Vol. 1, pp.579-585, 1995.
- [3] Christopher J. Melhorn, Le Tang, "Transients Effects of PWM Drives on Induction Motors", IEEE

Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No. 4, pp.1065-1072, 1997.

[4] E. Persson, "Transient effects in application of PWM inverters to induction motors", IEEE Trans on IAS, Vol.28, pp.1095-1101, 1992

[5] NEMA, "Application Guide for AC Adjustable Speed Drive Systems"

[6] 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, 1996

[7] J.M. Bentley and P.J Link, "Evaluation of motor power cables for PWM AC drives", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No. 2, pp. 342-358, 1997.