

인버터 구동 유도전동기에서 과도전압의 측정과 분석

Measurement and Analysis of Transient Voltage for an Inverter-fed Induction Motor

길경석[†] · 류길수^{*} · 박대원^{**} · 조영진^{**} · 천상규^{**} · 최수연^{***}

Gyung-Suk Kil · Keel-Soo Rhyu · Dae-Won Park · Young-Jin Cho · Sang-Gyu Cheon · Su-Yeon Choi

Abstract Induction motors are widely used as a source of driving force in electric vehicles and pulse width modulation (PWM) inverters are applied to their operation. The issue is that insulation of inverter-fed induction motors (IFMs) are more stressed than in line-powered motors by transient voltages. This paper dealt with experimental results on transient voltage produced by the PWM operation of an induction motor. The peak and the dv/dt of transient voltage depending on the length of power feeding cable and operating frequency were investigated. In the experiment, transient voltages up to 3.3PU of the rated-inverter voltage were recorded for the cable length of 50m. As the cable length is increased, the peak voltage appeared at the motor terminals increases. This phenomenon can be explained by the reflection and the transmission of travelling wave. Consequently, special care for the cable length between the motor and the inverter should be taken in the use of IFM to ensure the full life of insulation system.

Keywords : Electric vehicle, Insulation, Pulse width modulation (PWM) inverter, Inverter-fed induction motor (IFM), Power feeding cable, Reflection, Transmission, Travelling wave

요 지 유도전동기는 전기차량의 주요 동력원으로 광범위하게 사용되고 있으며, 유도전동기의 속도제어에 펄스변조 방식을 이용한 인버터의 사용이 증가하고 있다. 본 논문에서는 유도전동기의 인버터 구동시 발생하는 과도전압에 대해 연구하였다. 전원 케이블의 길이에 따른 과도전압의 크기를 측정하였으며, 시간변화율과 운전주파수에 의한 영향을 분석하였다. 실험결과, 케이블의 길이가 길어짐에 따라 과도전압의 최대값이 증가하였으며 50m 케이블에서 과도전압의 크기는 최대 3.3PU까지 측정되었다. 이러한 현상은 진행파의 반사와 투과에 의해 발생하며, 유도전동기의 인버터 구동시 케이블의 길이에 따른 과도전압의 영향을 고려하여 유도전동기의 절연을 설계해야 할 것이다.

주 요 어 : 전동차, 절연, 펄스폭변조 인버터, 인버터구동 유도전동기, 전원공급 케이블, 반사, 투과, 진행파

1. 서론

유도전동기는 전기에너지를 효과적으로 기계에너지로 변환하는 장치로서 산업전반에 걸쳐 주요 동력원으로 광범위하게 사용되고 있다. 현재 일반적으로 사용되는 유도전동기는 사용 전압에 따라 600V급 이하의 저압 유도전동기와

3,300V급 이상의 고압 유도전동기로 분류되며 이중에서 600V급 이하의 저압 유도전동기는 엘리베이터, 주차설비, 경전철과 같은 소형 전기철도 및 전기자동차 등에 사용되고 있다.

특히 전기철도나 전기자동차와 같은 전기차량에서 사용되는 유도전동기 즉, 견인전동기는 빈번한 기동과 정지, 진동과 같은 열악한 환경에 노출되어 있어 운전상태의 고신뢰성이 요구되고 있다[1]. 이러한 전기차량은 유도전동기의 원활한 속도제어를 위해 PWM(Pulse Width Modulation)제어 방식을 적용한 VVVF(Variable Voltage Variable Frequency)인버터를 사용하고 있다. 또한, 고속 스위칭이 가능한 IGBT

† 책임저자 : 정회원, 한국해양대학교 전기전자공학부 교수
E-mail : kilgs@hhu.ac.kr

TEL : (051)410-4414 FAX : (051)403-1127

* 정회원, 한국해양대학교 IT공학부 교수

** 정회원, 한국해양대학교 전기전자공학부 박사과정

*** 정회원, 한국해양대학교 전기전자공학부 석사과정

(Insulated Gate Bipolar Transistor)나 FET(Field Effect Transistor)등 전력용 반도체 소자가 개발되면서 유도전동기의 고효율 운전이 가능해졌으며, 가변속제어 성능이 크게 향상되었다. 그러나 고속 스위칭 소자를 적용한 인버터의 사용으로 저주파 운전에서 발생하지 않았던 과도전압에 대한 문제들이 대두되고 있으며, 600V이하 저압 유도전동기의 운전시에도 μs 당 최고 수 천 V의 과도전압이 발생할 수 있다[2-4].

이러한 과도전압이 유도전동기의 입력단자에 그대로 전달될 경우, 유도전동기의 절연에 스트레스를 주게 되어 조기열화를 초래하며, 케이블 및 전동기 권선에 불규칙적인 전압분포를 야기시켜 최종적으로 전동기 내부의 절연파괴를 일으킨다[5-8]. 발생하는 과도전압의 크기는 사용하는 인버터의 종류와 운전상태 및 설치조건에 따라 유도전동기의 입력단자에 다르게 나타날 수 있기 때문에 과도전압에 대한 정확한 측정과 분석은 유도전동기의 절연성능 및 수명예측을 위해 매우 중요하다.

본 논문에서는 전기차량용 견인전동기의 절연설계에 대한 기준과 절연성능 평가법을 마련하기 위해, 저압용 유도전동기의 인버터 구동시 과도전압의 발생 매커니즘을 해석하고, 케이블 길이에 따른 과도전압의 크기와 시간변화율, 운전주파수에 대한 영향을 분석하였다.

2. 과도전압의 발생

전력용 반도체의 급격한 발달로 인해 고속 스위칭이 가능해짐에 따라 유도전동기의 고효율 운전 및 원활한 속도제어가 가능해졌다. 그러나 상용주파수 전압과 같은 저주파 운전과는 달리 인버터 구동시에는 기존의 저주파 구동과는 다른 형태의 전압이 인가되어 유도전동기가 부담해야하는 여러 가지 문제점이 나타나고 있다. 일반적으로 사용되는 유도전동기의 인버터 구동 시스템의 예를 그림 1에 나타내었다.

PWM 제어방식의 인버터는 펄스형태의 전압을 출력하기 때문에 기본성분 이외에 스위칭 동작에 의해 많은 고조파성분이 포함되어 손실이나 잡음 등을 유발한다. 그림 2에 인버터 구동시 인버터 출력단자 및 전동기 입력단자에서의 전압파형의 예를 나타내었다. 인버터의 출력전압은 그림 2(a)와

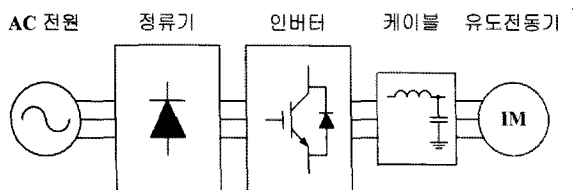


Fig. 1. Configuration of inverter-fed induction motors

같이 거의 구형파에 가깝지만, 전동기 입력단자에서는 그림 2(b)와 같이 고속 스위칭 동작으로 인한 과도전압이 발생하며 유도전동기의 운전동안 지속적으로 발생하여 전동기 내부절연에 스트레스를 주게 된다.

인버터의 고속 스위칭에 의해 발생하는 과도전압은 일종의 진행파(Travelling Wave)로서 케이블을 통해 유도전동기의 입력단자로 전달된다. 인버터의 출력단자와 케이블, 케이블과 유도전동기의 입력단자 사이에는 임피던스 불연속점이 존재하며 인버터의 출력전압이 전동기 입력단자에 인가되면 임피던스 불연속점에서 임피던스 부정합에 의한 전압의 반사가 발생한다[9].

이러한 임피던스 부정합에 의한 전압 반사는 케이블의 길이와 길 경우 케이블 및 전동기 고정자 권선에 전압분포의 불평형을 유발하고 특히, 전동기 입력단자에서의 입사전압과 반사전압의 중첩은 전동기 권선의 손상을 발생시킨다. 그림 3과 같이 케이블의 특성임피던스를 Z_C , 전동기의 특성임피던스를 Z_M , 인버터의 출력전압을 E_i 라고 하면 전동기 입력단자에서의 반사전압 E_r 과 투과전압 E_t 는 식 (1) 및 (2)와 같다.

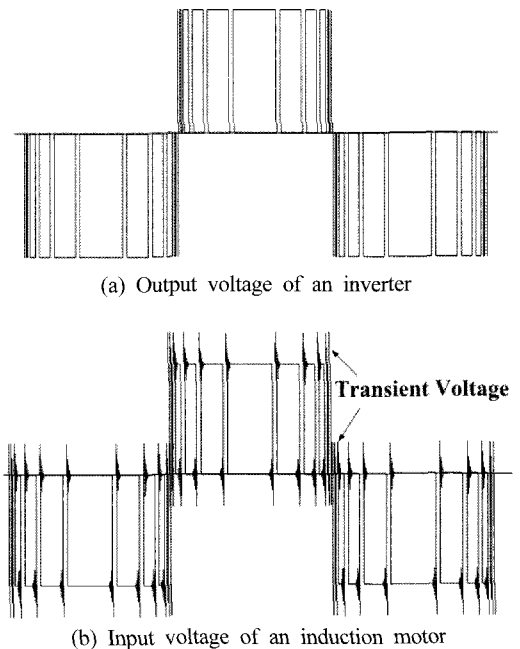


Fig. 2. Typical waveforms in inverter-fed induction motors

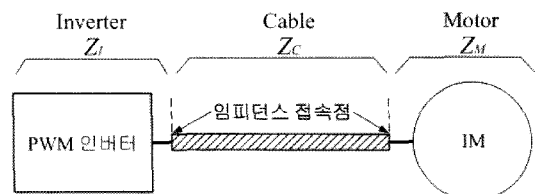


Fig. 3. Reflection and transmission of travelling wave

$$E_r = \frac{Z_M - Z_C}{Z_M + Z_C} \times E_i \quad [V] \quad (1)$$

$$E_t = \frac{2Z_M}{Z_M + Z_C} \times E_i \quad [V] \quad (2)$$

여기서, 전동기 입력단의 전압반사계수를 β_r , 전압투과계수를 β_t 라고 하면

$$\beta_r = \frac{Z_M - Z_C}{Z_M + Z_C} \quad (3)$$

$$\beta_t = \frac{2Z_M}{Z_M + Z_C} \quad (4)$$

로 나타낼 수 있다. 일반적으로 전력케이블은 50~200Ω 정도의 특성임피던스를 가지며, 전동기의 특성임피던스는 용량에 따라 달라지지만 수~수 십 kΩ 정도로 알려져 있다. 그리고 인버터 출력단자의 임피던스는 케이블이나 전동기에 비해 극히 작으므로 $Z_I \ll Z_C \ll Z_M$ 의 관계가 성립한다. 전동기의 특성임피던스는 케이블보다 훨씬 크므로 반사계수 $\beta_r \approx 1$, 투과계수 $\beta_t \approx 2$ 가 되어, 전동기 입력단자의 접속점에서 투과전압이 $2E_i$ 가 되어 전동기의 절연성능을 위협하게 된다.

3. 측정 및 분석

과도전압은 고속 스위칭 동작 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 유도전동기와 인버터사이의 케이블 거리에 따른 과도전압의 발생경향을 측정, 분석하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 3상 5마력 저압 유도전동기의 인버터 구동시 케이블의 길이 및 운전주파수에 따른 과도전압의 영향을 분석하였다. 실험장치의 구성은 그림 4와 같다.

길이에 따른 과도전압의 발생을 측정하기 위해 10m, 25m, 50m의 케이블을 사용하였다. 인버터의 운전주파수는 60Hz로

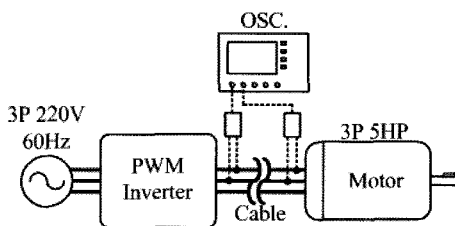


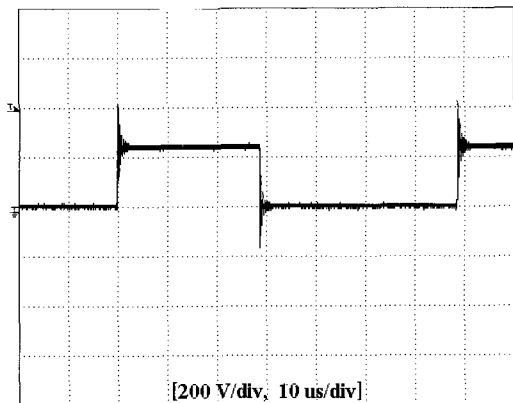
Fig. 4. Configuration of the experiment system

고정한 후 유도전동기의 입력단자에서 측정하였으며 파형의 예를 그림 5에 나타내었다.

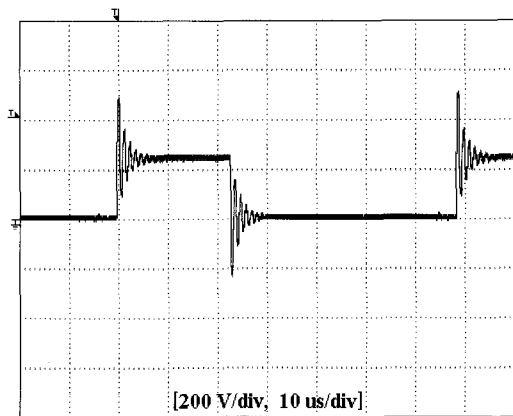
10m 케이블은 550V_{max}, 25m 및 50m에서는 각각 590V_{max}, 750V_{max}로 과도전압이 측정되었으며, 인버터의 출력전압 230V를 1PU라고 하면 그림 6과 같이 각각의 케이블 길이에 따라 과도전압의 크기가 약 2.4PU, 2.6PU, 3.3PU로 계산되었다. 또한 인버터에서 전동기까지의 케이블의 길이가 길어질수록 전동기에 나타나는 과도전압의 크기와 감쇄, 진동현상이 증가한다.

과도전압의 상승시간과 최대값은 그림 7과 같이 각각 288ns, 510V_{max}로 측정되었다. 이는 μs 당 1.77kV_{max}의 급준도의 전압변화율을 가지므로 전동기의 절연열화를 초래할 수 있다. 따라서 인버터와 전동기의 접속을 위한 케이블 길이를 선정할 경우에는 과도전압에 대한 절연위험을 고려해야 한다.

그림 8은 운전주파수에 따른 과도전압의 크기를 나타낸 것이다. 케이블 길이를 25m에서 운전주파수를 10Hz, 30Hz, 60Hz, 100Hz, 150Hz 및 180Hz로 가변하면서, 전동기 단자에 나타나는 과도전압의 크기를 측정하였다. 전동기의 운전주파수에



(a) 10 m cable



(b) 50 m cable

Fig. 5. Typical waveforms of transient voltage

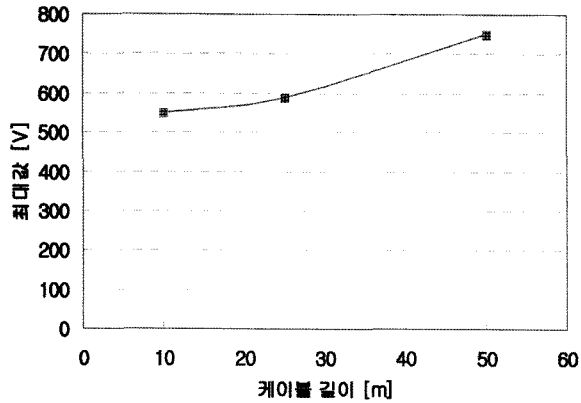


Fig. 6. Cable length vs. maximum transient voltage

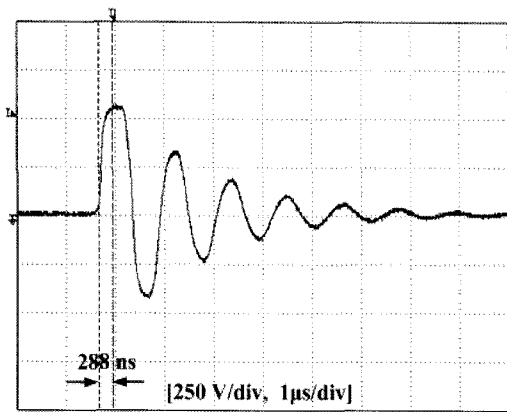


Fig. 7. Typical waveform of a transient voltage

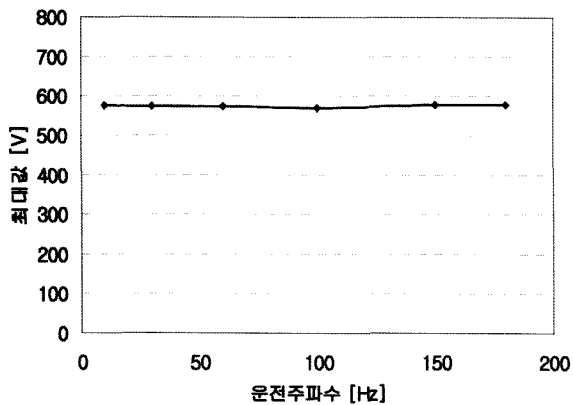


Fig. 8. Operation frequency vs. maximum transient voltage

다른 과도전압의 크기는 약 $570V_{max}$ ~ $580V_{max}$ 로서 케이블 길이에 대한 영향에 비해 크게 변화가 없었다.

4. 결론

본 논문에서는 전기차량용 견인전동기의 절연설계와 절연 성능평가에 적용하기 위해 저압용 유도전동기의 인버터 구동

시 발생하는 과도전압을 측정하였다. 접속 케이블의 길이와 운전주파수에 따른 과도전압의 크기와 시간변화율을 분석하였다. 케이블 길이에 따라 10m, 25m, 50m 케이블에서 각각 $550V_{max}$, $590V_{max}$, $750V_{max}$ 로 측정되었으며 인버터의 출력전압이 230V인 것을 감안하면 최대 3.3PU까지 발생함을 확인하였다. 또한, μs 당 $1.77kV_{max}$ 의 전압변화율을 보였다. 운전주파수와 과도전압의 관계는 운전주파수 10Hz~180Hz에서 측정된 결과, 과도전압의 크기에 영향을 주지 않았다.

실험결과로부터 견인전동기의 절연성능에 대한 시험시 내전압시험이나 절연저항시험 이외에 급준파 서지에 대한 시험이 수행되어야 할 것이며, 케이블의 길이에 따라 발생하는 과도전압의 크기가 달라지므로 이에 대한 평가가 이루어져야 할 것이다[10,11].

감사의 글

본 연구는 건설교통부 교통체계 효율화사업의 연구결과로 수행되었음.

참고문헌

1. 길경석, 송재용, 서항동, 김용주, 강동식, 황돈하(2005), “저압 유도전동기에서 미소부분방전 측정에 관한 연구”, 한국전기전자재료학회 논문지, 제18권, 제10호, pp.960-964.
2. H. A. Toliyat, G. Suresh, A. Abur (1997). “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.
3. L. Gubbala, A. Von Jouanne, P. N. Enjeti, C. Singh, H. A. Toliyat (1995). “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.
4. Christopher J. Melhorn, Le Tang (1997). “Transients Effects of PWM Drives on Induction Motors”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.33, No.4, pp.1065-1072.
5. E. Persson (1992). “Transient effects in application of PWM inverters to induction motors”, IEEE Trans on IAS, Vol.28, pp.1095-1101.
6. NEMA, “Application Guide for AC Adjustable Speed Drive Systems”
7. A. H. Bonnett (1996). “Analysis of the impact of pulse-width modulated inverter voltage waveforms on AC induction motors”, IEEE Trans on IAS, Vol.32, pp.386-392.
8. J. M. Bentley and P. J. Link (1997). “Evaluation of motor power cables for PWM AC drives”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.33, No.2, pp.342-358.
9. G. Skibinski (1996), “Design Methodology of a Cable Termination”

nator to Reduce Reflected Voltage on AC Motors”, Proc. 31st IEEE-IAS Annual Meeting, Vol.1, pp.153-161.
10. IEC 60034-15 (2003), Rotating electrical machines - Part 15: Impulse voltage withstand levels of rotating a.c machines with

form-wound stator coils, pp.7-13.
11. NEMA Standards Publication No. MG1 (2006), Motors and Generators - Part 20, pp.25-26.

(2007년 11월 2일 논문접수, 2007년 11월 13일 심사완료)