

인버터용 전동기의 절연신뢰성에 영향을 주는 주요 변수의 상관관계 분석

한후석, 송중환, 안희성
기초전력연구원

The Correlation Study of Factors which effect on Insulation Reliability of Inverter Motor

Han Hoo-sek, Song Jhong-hwan, Ahn Hee-sung
EESRI(Electrical Engineering and Science Research Institute)

Abstract - 산업용전동기는 신뢰성을 바탕으로 설계 및 제작되어 상용전압에 대한 기기의 신뢰성은 충분히 검증되어 있지만 스위칭 소자에 의해 주어지는 펄스상의 전압에 대하여는 신뢰성을 확보하지 못하고 있다. 본 연구에서는 인버터용 전동기의 신뢰성에 영향을 미치는 각종 변수(케이블의 길이, 단자전압, 습도, 온도, 스위칭 주파수 등)들을 검토하고 각 변수들 간의 상관관계를 실험을 통하여 분석하고 이를 통하여 전동기의 신뢰성을 예측할 수 있는 자료를 확보하여 인버터용 전동기의 신뢰성을 제고하고자 한다

1. 서 론

인버터용 전동기는 통상의 60Hz 전원 주파수를 가지는 전압과 달리 인버터에서 발생된 전압은 고주파 스위칭과 높은 dv/dt로 인해 전동기의 피로 현상이 심하게 나타나고 있어 전동기의 절연을 보장하거나 dv/dt를 억제할 다양한 출력 필터 또는 인버터와 전동기 사이 거리 제한 등을 추천하고 있다. 그러나 전동기의 신뢰성에 영향을 주는 요소는 단순히 인버터의 dv/dt와 전동기의 절연내력 뿐만 아니라 다른 많은 요소들이 직 간접적으로 영향을 주는 인자들이 존재하고 있다. 주된 인자로는 주변온도, 습도, 스위칭 주파수, 내부 void 유무 등이 있다. 특히 이러한 인자들이 독립적으로 신뢰성에 영향을 주는 것이 아니라 상호 복잡한 양상의 상관관계를 가지고 있다는 사실이다. 또한 절연내력을 검증하기 위한 대표적인 방법으로 부분방전 시험이 있지만 인버터 스위칭의 운전환경 하에서는 이 방법도 정확한 예측이 될 수 없다. 따라서 본 연구를 통하여 인버터용 전동기의 신뢰성을 수치적으로 제시하기 위한 구체적인 실험방법을 제안하고 이를 국내 전동기 및 인버터 산업에 적용하므로 사용자가 막연한 불안감에서 탈피하고 안심하게 사용할 수 있도록 하기 위하여 신뢰성을 예측하기 위한 절연모델 구축과 전동기의 신뢰성을 검증할 수 있는 인버터 개발 및 제작과 국내 전동기 제조업체와의 긴밀한 협조체제를 구축하여 국내 보급되는 있는 전동기를 대상으로 실험을 실시하여 관련 상관관계를 정립하였다.

2. 본 론

2.1 인버터의 개요 및 원리

PWM 인버터용 전동기의 운전시에는 인버터 및 전원선 영향과 모터 절연 시스템에 의해 발생된 전압을 고려하여야 한다. 또한, 전압소스 PWM 인버터 드라이브는 현재 사용되는 저전압 인버터 드라이브 중에서 가장 일반적인 형태이다. 따라서 필요한 주파수를 얻기 위해서는 리액터를 이용하여 교류 전압을 DC형태로 바꾸고, DC 필터 및 커패시터를 거쳐 전압을 평탄화한 후 다시 교류형태로 변환시킨다.

2.1.1 PWM인버터의 기본회로 구성

[그림 1]은 기본적인 원리를 설명하고 있으며 발생된 펄스는 모터와 합성 전류에 가해져 모터 인덕턴스에 의해 수정되며, 주파수스위칭을 기반으로 발생한 리플과 겹쳐져 싸인파의 주성분이 된다.

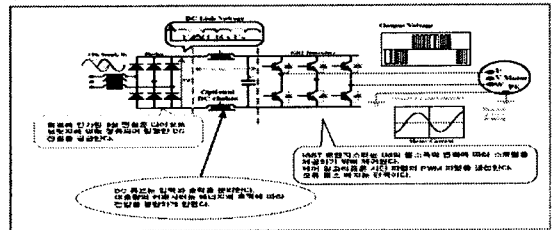


그림 1. PWM 인버터의 기본회로

2.2 인버터 구동에 따른 전동기의 특성

인버터에 의하여 구동되는 전동기의 특성은 케이블의 길이에 따른 단자전압과 권선간 인가전압 차이에 따라 다르게 나타나게 된다.

2.2.1 케이블 길이에 의한 영향

PWM 펄스의 상승시간은 매우 짧아 모터 케이블을 따라 전파되면서 펄스 형태를 변화시키거나 저압 오버슈트를 발생시킨다. 케이블은 송전선으로 고려될 수 있으며 분산된 직/병렬의 긴 선은 인덕터와 커패시터를 연결한다. 모터에 공급되는 단자전압은 케이블의 길이에 따라 다르게 나타나게 된다. [그림 2]는 케이블 길이에 따른 모터 단자 전압의 변화를 나타내고 있다.

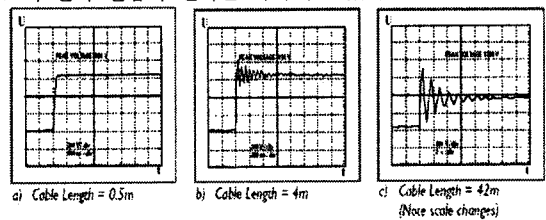


그림 2. 케이블 길이에 따른 모터 단자 전압의 변화

2.2.2 권선간 인가전압 차

모터의 권선요소(모터등급, 권선의 유형, 턴수, 코일의 크기, 턴 증가속도 등)로 구성되어 있으며, 모터 단자의 피크 전압의 상승 시간에 대해 첫 번째 코일의 전압이 변화된다. 즉 정현파 공급전압에 의해 코일 종단은 코일수에 따라서 소량의 위상 전압이 인가된다. 이로 인해 가변속도 드라이브는 코일 내에서 상당한 전압 스트레스의 증가가 일어나게 된다.

2.2.3 전동기 절연열화에 영향을 주는 요인

전동기 절연열화에 영향을 주는 요인은 권선의 코팅, 전동기의 권선전압 분포현황, 권선의 합침, 인버터 구동시 단자전압, 습도, 온도, 인버터의 스위칭 전압 상승률, 인버터의 스위칭 주파수, 출력전압 duty등이다. 본 연구에서는 이중 가장 크게 전동기에 영향을 끼치는 온도와 스위칭 전압 상승률 그리고 스위칭 주파수에 대하여 실험을 하고 영향을 평가하였다.

2.3 상호 교호작용

절연열화에 영향을 주는 인자들 간의 상호 교호작용을 검토하기 위하여 자료를 분석한 결과 아래 그림처럼 상호 작용이 있음을 알 수 있다.

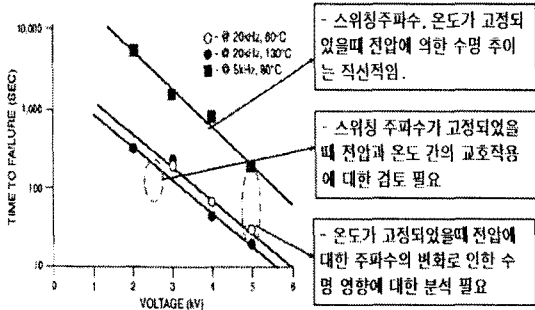


그림 3. 입수된 자료 분석결과 예시 1

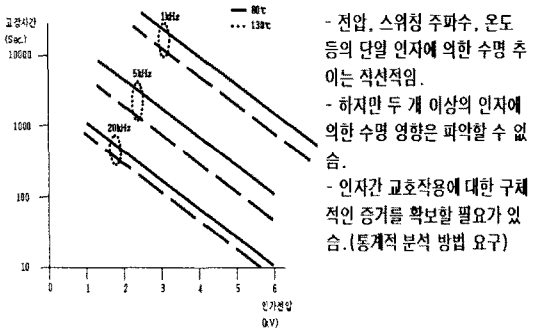


그림 4. 입수된 자료 분석결과 예시 2

2.5 실험용 전용 인버터 개발

본 연구의 실험을 위하여 피 시험 대상인 전동기와 각 전동기에 특정 펄스 형태의 전압을 인가하기 위한 인버터를 개발하였으며, 특정 펄스는 PWM 형태를 기본으로 하여 시험 환경을 위하여 다음과 같은 특수 사항을 추가하였다.

2.5.1 Carrier 주파수 변경 가능 기능

인버터의 스위칭 주파수와 다른 변수들과의 상관관계를 파악하기 위하여 스위칭 주파수를 가변시킬 수 있어야 한다. 가변 범위는 시중에서 시판되고 있는 인버터의 모든 주파수가 포함되어야 하며, 더욱이 가혹한 운전 환경 또는 향후 전개될 제품까지를 고려하여 개발할 가변 주파수 범위를 정하여야 한다. 또한 스위칭 주파수로 인한 전자 잡음을 억제하기 위하여 주파수를 가청영역 이상까지도 고려해 볼 수 있으며, 또한 대용량 인버터의 스위칭 주파수는 수 KHz 이내로 운전되기 때문에 이와 같은 사항을 고려하여 본 연구에서 개발한 인버터는 최하 1KHz에 최대 30KHz까지 변경 가능하도록 설계하였다.

2.5.2 dv/dt 변경 가능 기능

전동기에서 요구하는 가변속을 구현하면서 변환 효율을 높이기 위해 거의 모든 인버터는 고압을 빠른 시간에 스위칭 하여 원하는 전압과 주파수를 얻는다. 이때 스위칭 상태가 변화하는 과도기간은 인버터 자체에서 발열이 일어나는 구간으로 스위칭 손실 구간이 되며, 고효율의 인버터가 되기 위해 될 수 있는 한 과도 기간을 단축하려고 하며 스위칭 소자의 개발도 이러한 점을 가지고 진행되고 있다. 이때 나타나는 큰 값의 dv/dt는 전동기 절연 열화에 치명적일 수 있다. 따라서 개발한 인버터는 dv/dt 값이 원하는 크기로 구현 가능하도록 하였으며, 스위칭 소자도 이에 적합한 소자를 사용하였다.

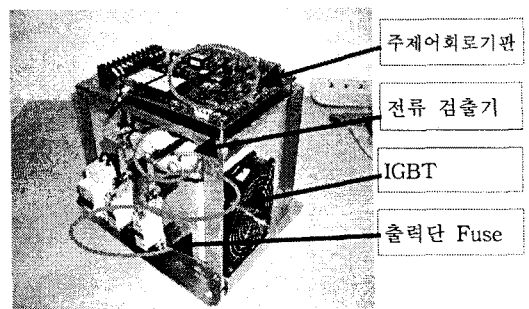
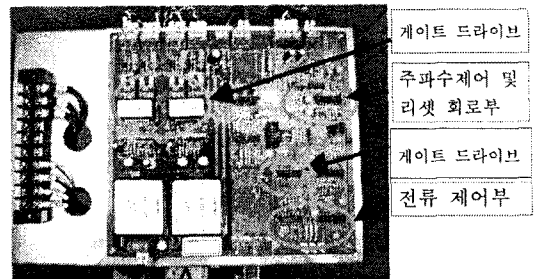
2.5.3 직류 전압 가변 기능

우리나라의 공칭전압은 220v/380v이지만 이미 운전되고 있는 440v에도 적용 가능한 인버터가 구축되어야 하며, 전압의 크기는 dv/dt와 밀접한 연관성을 가지고 있어 전동기의 절연 열화에 미치는 매카니즘을 분석할 수 있다. 하지만 현재까지 dv/dt와 인가전압의 크기에 대한 상관관계 또는 독립성에 대한 연구결과가 없다. 따라서 본 연구에서 직류전압과 dv/dt를 두개의 변수로 분리하여 변수간 상관관계를 분석하기 위하여 직류 전압을 가변할 수 있도록 개발 하였다.

2.5.4 보호 기능

전동기의 절연 열화를 시험하는 중 급속한 열화 현상은 뒤이어 전동기 권선 내에서 아크 방전을 야기시키며 인버터의 고장, Fuse소손, 화재 등 문제로 번질 가능성을 배제 할 수 없다. 따라서 안전을 위하여 보호장치 등을 적용하였다.

이와 같은 기능 등을 수행하도록 하여 시험에 적용될 회로를 개발하였으며, 회로 기판이 장착된 단상 인버터 유닛을 제작하였다.



[그림 5] 개발된 시험 전용 제어회로 및 인버터 유닛

2.6 실험을 위한 준비

실험을 위하여 전력기기 항온항습 시험 챔버를 구비하고 아래 그림처럼 개발한 인버터와 시험용 전동기를 구비하여 실험을 실시하였다.

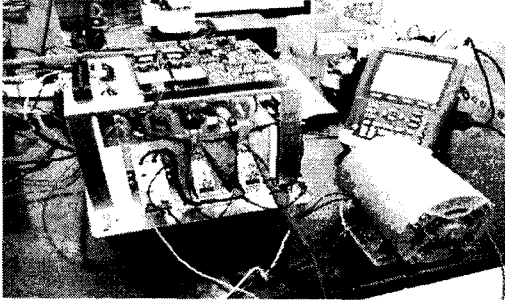


그림 6. 시험전동기에 연결한 전경

2.7 실험

실험은 실험1과 실험2로 나누어 실시하였으며, 실험 1은 챔버 온도를 80℃로 하고 스위칭 주파수를 10KHz, 20KHz, 30KHz와 DC전압을 2,420V, 3,477V, 3,557V로 실시하였으며, 실험 2는 챔버 온도를 100℃로 하고 스위칭 주파수를 10KHz, 20KHz, 30KHz와 DC전압을 2,420V, 3,477V, 3,557V로 실시하였다. 총 12대를 실시하였으나 5대는 실험중 이상현상으로 data를 취득하지 못하였다.

2.7.1 실험 결과

순번	챔버 온도 (t)	스위칭 주파수 (KHz)	DC전압 (V)	모터 온도 (t)	용단 시간 (시간)
1	80	30	2,420	94	0.4
2		10	3,557	115	0.37
3		20	3,557	99	0.18
4		30	3,447	97	0.19
5	100	10	2,420	130	0.33
6		20	2,420	131	0.33
7		30	3,447	119	0.14

표 1. 실험1, 실험2의 data

2.7.2 실험 파형

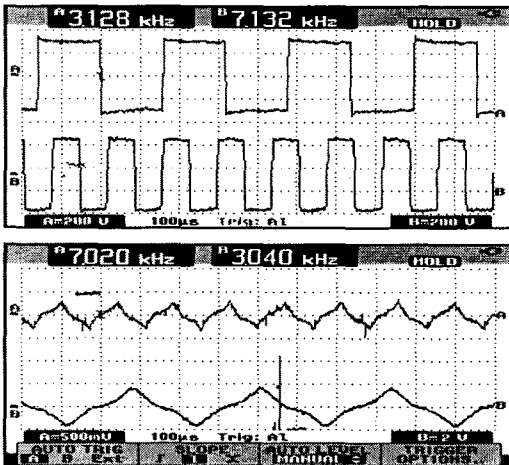


그림 7. 인버터에 공급된 전압 및 전류 파형 예시

3. 결 론

인버터용 전동기의 절연신뢰성에 영향을 주는 주요 변수의 상관관계 분석을 위하여 이에 필요한 전용 인버터를 개발 하였으며, 개발된 인버터를 이용하여 실험을 실시 하였다. 실험을 실시한 결과 인버터의 스위칭 주파수와 주위 온도, DC 전압에 따라 전동기의 권선이 열화하는 것을 볼 수 있었다.

그러나 실험 1과 실험 2에 의하여 얻어진 data를 통계법에 의하여 분석한 결과 취득된 data가 너무 적어 전동기의 열화에 영향을 미치는 인자의 상관관계의 명확한 분석이 되지 않아 추가적인 실험이 필요하여 현재 시험을 진행 중에 있다. 따라서 본 연구에서는 통계기법을 이용한 상관관계 분석은 추후에 실험이 완료되면 취득된 data를 이용하여 분석을 한 후 발표할 예정이다.

본 연구는 지식경제부 지원에 의하여 기초전력연구원 (R-2005-B-133) 주관으로 수행된 과제임

[참 고 문 헌]

- [1] GAMBICA/REMA, "Motor Insulation & PWM Inverter Drives", Shortform Guide, 1999.
- [2] Skibinski.G.Erdman, J.Pankau, J.Campell, Assessing AC Motor Dielectric Withstand Capability to Reflected Voltage Stress using Corona Testing, 1996. IEEE IAS Record.
- [3] NEMA MG1-1998, Motors and Generators Part 31, "Definite-Purpose Inverter Fed Polyphase Motors"
- [4] LINCOLN Electric, Motor Division, "Evaluating Inverter-Duty Motor Insulation Systems using Corona Inception Voltage", Technical Brief, 1997.
- [5] G. C. Stone, "The Statistics of Aging Models and Practical Reality", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 28 No. 5, Oct. 1993.
- [6] 송 서일, 실험계획법, 한경사, 2005년 6월 30일
- [7] 박 성현, 현대실험계획법(개정판), 2005년 8월 1일