

통계 분석을 이용한 인버터용 전동기의 절연신뢰성에 영향을 주는 주요 변수의 상관관계 분석

한상석^{1*}
¹전주용덕초등학교

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

Han Sang-Seok^{1*}

¹JeonJu YoungDeok ElementarySchool

요 약 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.

Abstract An industrial growth needs high quality of productivity and accuracy. So, the needs of power electronics became pressing. Recently both interest and demand about the technique of power electronics systems has been increased. Though power electronics has a lot of strong point, there are several problems which are harmonic effect, EMI(Electromagnetic Interference), malfunction of electric machinery, harmful effect on human, audible noise and so on. Because these problem are a potent influence on motor, so there needs the manufacture and redesign of motor. The real motors of industrial application have designed and manufactured on the basis of confidence. The study on motor using utility power source was verified sufficient to identify confidence of electric machinery on utility power source. However, a study on confidence is in progress about pulse source by switching device. An advanced company are studying to solve this problem. In this research, it is studied that each variables effecting motor reliability have correlation through experiment and more over forecasting the reliability of motor under inverter operation.

Key Words : Inverter Motor, Insulation, Correlation Analysis, Reliability

1. 서론

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 보강하거나 dv/dt를 억제할 다양한 출력 필터 또는 인버터와 전동기 사이 거리제한 등을 추천하고 있다. 그러나 전동기의 신뢰성에 영향을 주는 요소는 단순히 인버터의 dv/dt와 전동기의 절연 내

력 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 수치적으

*교신저자 : 한상석(hanssda@nate.com)

접수일 09년 11월 25일

수정일 (1차 10년 03월 09일, 2차 10년 03월 30일)

게재확정일 10년 04월 09일

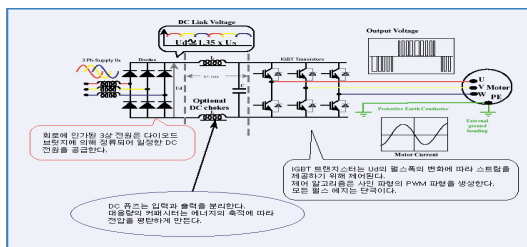
로 제시하기 위한 구체적인 실험방법을 제안하고 이를 국내 전동기 및 인버터 사업에 적용하므로 사용자가 막연한 불안감에서 탈피하고 안심하게 사용할 수 있도록 하기 위하여 신뢰성을 예측하기 위한 절연모델 구축과 전동기의 신뢰성을 검증할 수 있는 인버터 개발 및 제작과 국내 전동기 제조업체와의 긴밀한 협조체제를 구축하여 국내 보급되고 있는 전동기를 대상으로 실험을 실시하여 관련 상관관계를 정립하였다.

2. 본론

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 교류 형태로 변환시킨다.

그림 1은 PWM인버터의 기본회로 구성으로서 기본적인 원리를 설명하고 있으며 발생된 펄스는 모터와 합성 전류에 가해져서 모터 인덕턴스에 의해 수정되며, 주파수스 위치를 기반으로 발생한 리플과 겹쳐져 사인파의 주성분이 된다.



[그림 1] PWM 인버터의 기본회로

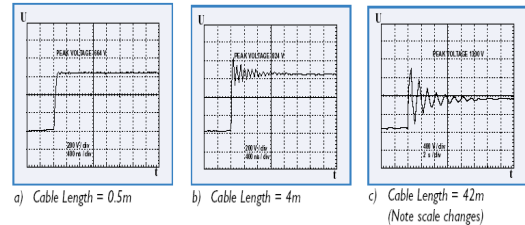
2.2 인버터 구동에 따른 전동기의 특성

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 2는 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 코일 수에 따라서 소량의 위상 전압이 인가되다. 이로 인해 가변 속도 드라이브는 코일 내에서 상당한 전압 스트레스의 증가가 일어나게 된다.

2.2.3 전동기 절연열화에 영향을 주는 요인

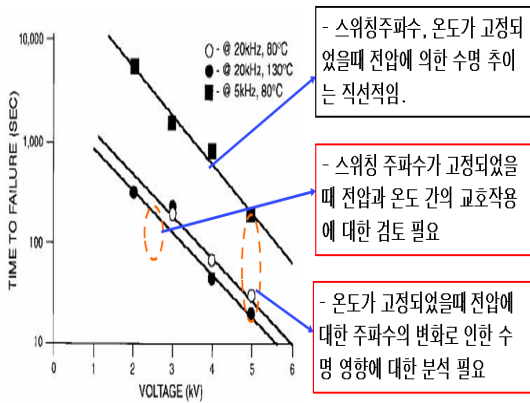
전동기 절연열화에 영향을 주는 요인은 권선의 코팅, 전동기의 권선전압 분포현황, 권선의 함침, 인버터 구동시 단자전압, 습도, 온도, 인버터의 스위칭 전압 상승률, 인버터의 스위칭 주파수, 출력전압 dv/dt 등이다. 본 연구에서는 이중 가장 크게 전동기에 영향을 끼치는 온도와 스위칭 전압 상승률 그리고 스위칭 주파수에 대하여 실험을 하고 영향을 평가하였다.

2.3 상호 교호작용

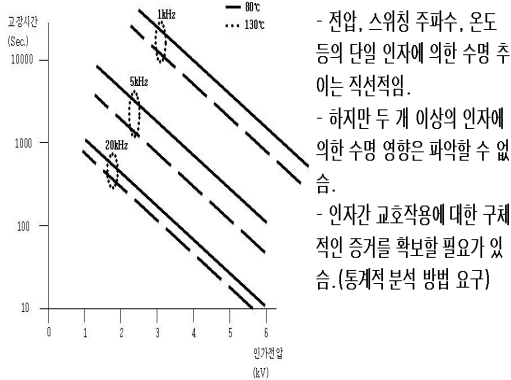
절연열화에 영향을 주는 인자들 간의 상호 교호작용을 검토하기 위하여 자료를 분석한 결과 아래 그림 3과 그림 4처럼 상호 작용이 있음을 알 수 있다

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.



[그림 3] 입수된 자료 분석결과 예시 1



[그림 4] 입수된 자료 분석결과 예시 2

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.

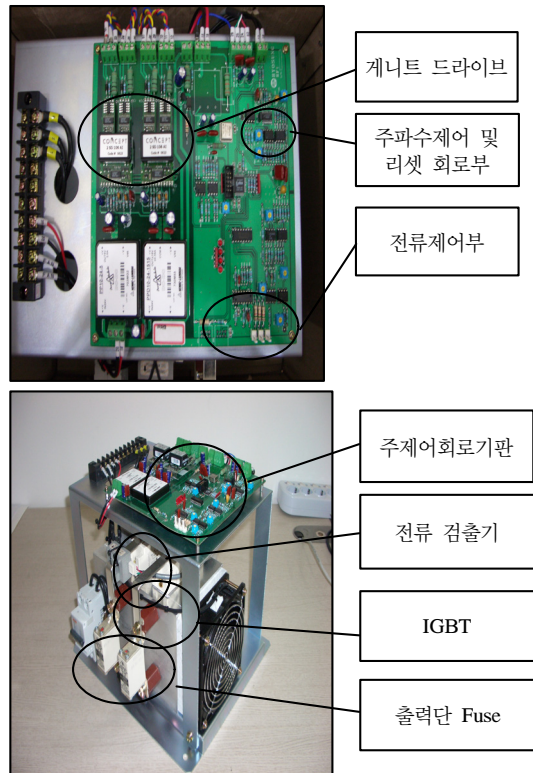
2.5.2 dv/dt 변경 가능 기능

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 단축하려 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 분석 할 수 있다. 하지만 현재까지 dv/dt와 인가전압의 크기에 대한 상관관계 또는 독립성에 대한 연구결과가 없다. 따라서 본 연구에서 직류전압과 dv/dt를 두개의 변수로 분리하여 변수 간 상관관계를 분석하기 위하여 직류 전압을 가변할 수 있도록 개발 하였다.



[그림 5] 개발된 시험 전용 제어회로 및 인버터 유닛

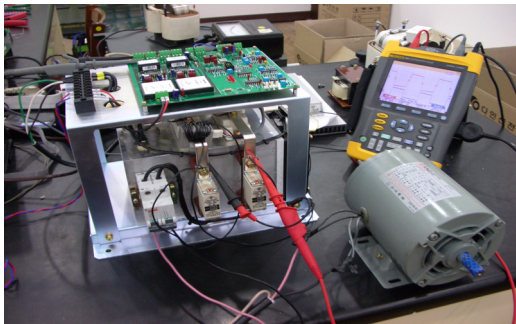
2.5.4 보호 기능

전동기의 절연 열화를 시험하는 중 급속한 열화 현상은 뒤이어 전동기 권선 내에서 아크 방전을 야기 시키며 인버터의 고장, Fuse소손, 화재 등 문제로 변질 가능성을 배재 할 수 없다. 따라서 안전을 위하여 보호 장치 등을 적용하였다.

이와 같은 기능 등을 수행하도록 하여 시험에 적용될 회로를 개발하였으며, 회로 기판이 장착된 단상 인버터 유닛을 제작하였으며, 기본적인 제어회로 및 인버터 유닛은 그림 5에 나타나 있다.

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 1그룹실험과 2그룹실험 그리고 3그룹실험 나누어 실시하였으며, 1그룹실험은 챔버 온도를 80℃로 하고 스위칭 주파수를 10kHz, 20kHz, 30kHz와 DC전압을 3,000V, 4,000V, 5,000V로 실시하였으며, 2그룹실험은 챔버 온도를 100℃로 하고 스위칭 주파수를 10kHz, 20kHz, 30kHz와 DC전압을 3,000V, 4,000V, 5,000로 실시하였으며, 3그룹실험은 챔버온도 40℃로 하고 DC전압을 4,000V로 실시하였다.

2.7.1 실험 결과

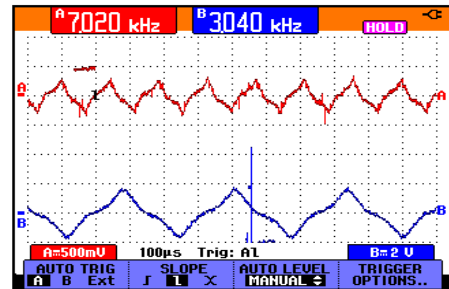
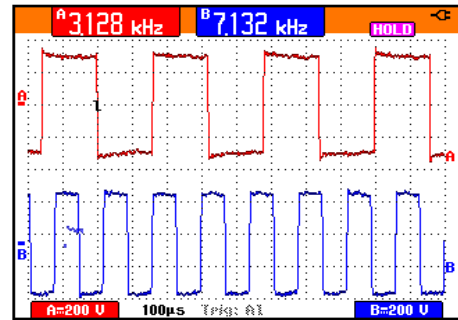
[표 1] 실험 data

순번	챔버 온도 (℃)	스위칭 주파수 (kHz)	DC전압 (V)	모터 온도 (℃)	용단 시간 (시간)
1	80	10	5,000	99	417

2		20	5,000	86	265
3		30	5,000	82	168
4		10	4,000	116	1700
5		20	4,000	82	622
6		30	4,000	82	203
7		10	3,000	84	497
8		20	3,000	86	406
9		30	3,000	85	242
10		10	5,000	101	290
11		20	5,000	101	170
12		30	5,000	101	62
13	100	10	4,000	102	607
14		20	4,000	102	421
15		30	4,000	102	292
16		10	3,000	126	1990
17		10	4,000	76	601
18	40	20	4,000	50	207
19		30	4,000	53	375

2.7.2 실험 파형

실험을 위하여 설계하여 제작한 인버터의 출력 스위칭 주파수를 10, 20, 30kHz로 변환할 수 있도록 하였으면, 그림7은 이중 30kHz의 공급전압 주파수 파형으로 안정적인 전동기에 공급되고 있음을 보여주고 있다.



[그림 7] 인버터에 공급된 전압 및 전류 파형 예시

2.7.3 실험Data 취득 결과에 대한 분석

2.7.3.1 모형의 유의성 및 성능

표 2은 추정된 모형의 유의성 및 성능 검증을 위하여 ANOVA 분석을 실시한 결과이며, 추정된 모형의 사용변수 6, 전체 실험수 19, 모형의 자유도 6, 전체자유도 18이 되어 자유도는 충분하였다. 또한 모형의 유의 확률이 0.0001로 모형의 유의성이 아주 높으며 특히 결정계수의 값이 92.52로 모형에 사용된 변수가 반응변수인 전동기의 수명의 변동을 92.52% 설명하고 있어 추정모형의 정도가 아주 높다고 판단되었다.

[표 2] ANOVA 결과

구분	자유도	제곱합	평균제곱합	F값	유의확률
모형	6	4189426	698238	24.72	<0.0001
오차	2	338923	28244		
전체	18	4528349			

2.7.3.2 인자의 유의성 해석

표 3은 모형에 사용된 인자의 유의성을 자세히 알아보기 위해 각 인자의 추정값과 유의확률을 나타낸 것이다.

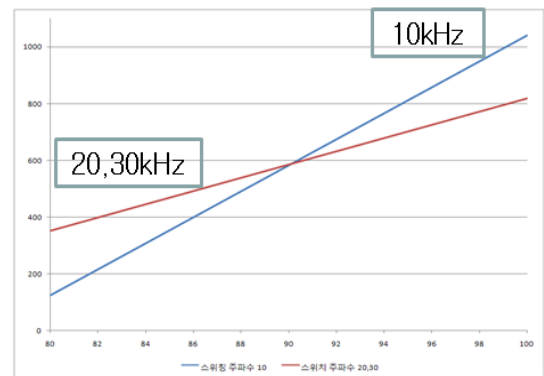
[표 3] 인자별 유의성 검증결과

인자	추정값	t값	유의확률	
상수값	-415.40	-1.44	0.1760	
주 효과	챔버온도	-18.27	-4.01	0.0017
	주파수(=10)	-2027.30	-4.17	0.0013
	DC전압(=3,000)	364.55	3.28	0.0066
	DC전압(=4,000)	273.56	2.84	0.0150
	내부온도	23.31	3.89	0.0022
교호작용	주파수(=10)*내부온도	22.50	4.34	0.0010

모형에 포함된 인자는 모두 유의수준 5%에서 유의하며 주 효과는 5개, 교호작용은 1개로 나타났다. 먼저 챔버 온도의 추정 값이 -18.27로 챔버 온도가 1℃ 올라가면 전동기의 수명은 18.27초로 내려간다고 볼 수 있으며, 마찬가지로 스위칭 주파수도 10[kHz]인 경우가 20~30[kHz]인 경우에 비해 전동기의 수명이 2027.3초 줄어들었다. DC전압이 3000[V]일 때와 5000[V]일때 전동기의 수명은 364.55초, DC전압이 4000[V]일 때와 5000[V]일때 전동기 수명은 273.56초 증가하여 DC 전압이 높아질수록 전동기 수명은 줄어들었다. 스위칭 주파수의 경우 10[kHz]일 때와 10[kHz]가 아닐 때 전동기 수명과 내부온도의 관계가 차이가 나타나고 있음을 알 수 있다.

2.7.4 실험Data 분석에 대한 평균도표

모형 추정 및 유의성 검정 결과 스위칭 주파수와 전동기 내부온도간의 교호작용이 유의한 것으로 나타났다. 그림 8의 전동기 수명의 평균도표에서 볼 수 있듯이 스위칭 주파수가 10kHz인지 여부에 따라 내부온도와 전동기 수명간의 관계는 상당한 차이가 나타나는 것을 알 수 있다. 특히 스위칭 주파수가 10kHz가 아닐 때에 비해 10kHz일 때 내부온도와 전동기 수명간의 기울기가 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 주파수가 10kHz일 때 내부온도에 따라 전동기 수명의 변화가 크게 나타난다는 것을 의미하며, 20,30kHz도 같은 의미이다.



[그림 8] 전동기 수명의 평균도표

3. 결론

인버터용 전동기의 절연신뢰성에 영향을 주는 주요변수의 상관관계 분석을 위하여 이에 필요한 전용 인버터를 개발 하였으며, 개발된 인버터를 이용하여 실험을 실시하였다. 실험을 실시한 결과 인버터의 스위칭 주파수와 주위 온도, DC 전압에 따라 전동기의 권선이 열화 하는 것을 볼 수 있었다.

전동기 주위온도의 영향은 챔버 온도가 1[℃]올라가면 전동기 수명은 18.27초 내려가며, 스위칭 주파수의 영향은 10kHz인 경우가 20~30kHz인 경우에 비해 전동기 수명이 2027.3초 줄어들었으며, 전압에 대한 영향은 DC 전압이 높아질수록 전동기 수명은 줄어드는 것을 알 수 있었다. 또한 주요변수의 상호 교호작용에 대하여서는 주파수에 따라 전동기의 수명과 내부온도의 관계가 차이가 있으므로 변수 간에 상호 교호작용이 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] GAMBICA/REMA, "Motor Insulation & PWM Inverter Drives", Shortform Guide, 1999.
- [2] Skibinski.G.Erdman, J.Pankau, J.Campbell, 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, "Evaluation 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] 송서일, 실험계획법, 한경사, 2005년 6월 30일
- [7] 박성현, 현대실험계획법(개정판), 2005년 8월 1일

한 상 석(Sang-Seok Han)

[정회원]



- 1991년 2월 : 전주교육대학교 실과교육 학사
- 2002년 2월 : 전주교육대학교육대학원 실과교육과 석사
- 2008년 2월 : 전북대학교 메카트로닉스 공학과 박사
- 2004년 11월 ~ 현재 : 전주교육대학교 시간강사 및 전주용덕초등학교 교사

<관심분야>

전기공학, 제어공학, 시스템공학