

회전 기기의 수명 예측 평가에 관한 연구

A Study on the Expected Life Evaluation of Rotating Machine

김기준*, 김상진*, 오용철*, 성낙진**

(Ki-Joon Kim*, Sang-Jin Kim*, Yong-Chel Oh*, Nak-Jin Seong**)

Abstract

Traction motors that is one of the rotating machines for urban transit EMU have been subjected to increased demand for higher operating temperature, more demanding duty cycles, higher starting current, frequent voltage transients and severe environmental exposure. With the advent of PWM drives using power IGBTs in addition to the thermal considerations, it is important to take into account the impact of the dielectric stress upon the winding insulation system life. In analyzing the life of the stator winding, which is the heart of the motor, the majority of all winding failures are usually caused by a combination of various stresses acting on the insulation materials and system. In this paper, to evaluate the expected life of traction motor for urban transit E.M.U, it is proposed a new test method of complex accelerating degradation.

Key Words(중요용어) : 회전 기기, 열화, 인버터, 건인 전동기, 수명 평가.

1. 서 론

우리들의 일상 생활에서부터 산업 현장에 이르기까지 각종 회전 기기는 매우 중요한 동력원으로 이용되고 있다. 응용 범위에 따라 부하의 종류가 다르기 때문에 회전 기기의 종류도 다르게 채택이 되고 있으며 제어되는 방식도 다르게 된다.

1975년 서울 지하철이 처음으로 상용 운전을 시작한 이래로 지하철용 건인 전동기는 직류기의 사용에서 전력전자의 급속한 발달에 힘입어 유도기로 사용이 증가하고 있는 추세이다. 특히, IGBT와 같은 대전력 고속 스위칭에 의한 인버터의 성능 개선과 VVVF 제어에 의한 유도전동기의 효율적인 운전이 가능하게 되면서, 국내 도시 철도 차량에 사용되는 건인 전동기 역시 VVVF 제어 PWM 인버터로 구동되는 200kW급 3상 능형 유도 전동기를 표준 사양으로 선정하여 열악한 운전 환경(진동, 고온, 먼지, 철분, 기름 등)과 최소한의 정비 상태에서 20년을 상회하는 운전 수명을 보장하도록 규정하고 있다.

따라서 본 연구에서는 열악한 환경하에서 운영중에

있는 인버터 구동 건인 전동기를 대상으로 하여 회전 기기의 운전 수명을 추정하기 위한 시험 방법과 수명 예측 방법에 관하여 살펴보도록 한다.

2. 건인 전동기의 열화기구

회전 기기 중의 하나인 철도 차량용 건인 전동기는 열적, 기계적, 환경적 스트레스의 영향을 복합적으로 받고 있으며, 특히 건인 전동기 사고 중 절연 파괴가 많은 비율을 점유하고 있는데 이는 부분방전을 포함한 절연열화와 관련된 사고 발생 기구가 지배적이며 여기에 기계적 진동과 환경적 요인이 복합된다. 전동기의 코일 절연이 운전 중에 받는 열화를 요인별로 분류하면 다음과 같다.

2.1 열적 열화

일반적으로 운전시에 발생하는 온도 상승과 과부하 운전이 이루어질 때의 이상 온도 상승으로 인해 열적 열화가 발생된다. 마이카와 유리섬유 등의 무기 재료는 내열성이 높기 때문에 문제가 되지 않으면 절연 내력나 접착제, 수지, 바니쉬와 같은 유기재료가 문제로 된다. 열적 열화에 의해 마이카 테이프의 층간 접착 저하, 층간 박리, 공극의 생성 등이 일어나 현저히 저하된다.

* : 인천전문대학 제어계측과

** : 인천전문대학 전기과

FAX : 032-760-8772

E-Mail : kjkim@falcon.icc.ac.kr

2.2 전기적 열화

절연층 내에 박리나 보이드가 존재하면, 운전중의 대기전압으로 부분 방전이 발생하여 절연체를 열화시키게 된다. 부분 방전에 의한 열화는 방전 발생시의 열, 활성 산소(O_2^-)와 오존(O_3)의 생성, 방전에 의한 물리적인 분해 등을 수반한다. 일단 부분 방전이 발생되면 유기 재료가 분해되고, 마이카와 유리섬유 주변의 보이드가 확대되며, 보이드 간에 교락이 일어나고, 보다 큰 부분 방전이 초래하게 된다. 부분 방전 열화는 전계의 집중이 용이한 도체 주변에서 시작되며 충전(권선간) 절연의 절연 내력을 저하시키는 경우가 많다. 부분 방전에 의해 절연층이 열화 되면 마이카와 같은 무기 재료가 부스러지는 경우가 관찰되기도 한다.

2.3 기계적 열화

기계적인 스트레스로는 기동/정지시의 전자력, 운전중의 진동, 냉열 사이클에 의한 응력 등이 있다. 이러한 기계적 응력은 권선 엔드부에 집중적으로 가해져 엔드부 절연층을 손상시킨다.

2.4 환경적 열화

주요 절연 물질은 유기 재료이므로 광범위한 화학적 오염의 가능성이 존재한다. 따라서 열화 요인으로서 외부 환경은 전동기가 설치되어 있는 장소의 분위기 조건이라 할 수 있다. 전동기의 용도에 따라 화학 약품, 기름, 습기, 도전성 먼지 등 다양하게 분위기가 달라질 수 있으므로, 열화의 형태도 다양하다.

2.5 인버터 구동시의 추가 열화

전인 전동기의 절연 구성에서 전압 부담은 권선간(층간) 절연, 상간 절연, 대지 절연으로 나누어지며, 구조적으로 보면 슬롯부 절연, 코일 엔드부 절연, 접속부 및 리드선 절연으로 나눌 수 있다.

(1) 반사파 과전압에 의한 열화

인버터 구동 전동기 단자에 인가되는 반사파에 의한 과전압은 '인버터-케이בל-전동기'로 구성되는 특수성으로 인해 나타나는 현상으로 그 원인 및 문제점은 다음과 같다.

- ① 전동기 단자의 과전압 발생
- ② 전동기 베어링 전류 문제
- ③ 접지 전류

(2) 고조파에 의한 열화

인버터 구동 유도 전동기에서는 인버터 출력 전압에 운전 주파수의 고조파 성분과 PWM 운전시 캐리어(스위칭) 주파수의 고조파가 포함되어 있으므로 일반적인 정현파 구동에서와는 다른 현상이 나타나며, 고조파가 전원에 포함되어 있는 경우 일반적으로 나타나는 문제점들은 다음과 같다.

- ① 전동기 과열 현상
- ② 토오크 맥동
- ③ 자기적(magnetic) 및 구조적 불균일함
- ④ 전자파 장애(EMI)

3. 절연 신뢰성 평가 및 수명 예측

기존의 평가 방법은 권선 샘플(모터렛)이나 완성 전동기를 대상으로 일련의 열적 스트레스, 기계적 스트레스 및 흡습이나 침수 이후 전기적 스트레스를 주기적으로 인가하는 가속 열화를 통해 수명을 평가하고 있다. 이때 열적 열화는 10℃수명 반감 법칙을 적용하며, 전기적 스트레스는 60Hz 사인파 교류나 간헐적인 임펄스 인가로만 제한된다.

최근 인버터 구동에 따른 전동기 절연시스템의 고조파와 반사파 과전압 문제에 관해 IEC 792나 NEMA MG-31 등의 규격에서 시험적인 시도를 소개하고 있지만, 불행히도 수 kHz를 넘는 고속 스위칭시 권선 절연의 안전 한계와 예상 수명을 보장하는 과도 최대 반복 전압(V_m)과 상승률(dV/dt)을 규정하지는 못하고 있다. 또한 이들 규격은 저전압 비형권 전동기를 대상으로 한 것으로서 사용 재료와 절연 구성이 현저히 다른 고정자형권 코일 권선의 견인 전동기에 대해 이를 그대로 적용하기는 어려운 실정이다.

따라서 본 연구는 권선 샘플을 이용한 200Class 절연에 대한 열적 열화와 PWM 인버터 과전압 파형을 모의한 전기적 열화를 복합하여 수행할 수 있는 새로운 절연 신뢰성 및 수명 평가법을 제안한다.

3.1 열적 열화 수명 평가

10℃ 수명 반감 법칙에 의거한 열적 열화 시험은 최고 허용 온도보다 높은 온도에서 각 선택 온도 차이가 20℃ 이상이 되도록 3가지 이상의 온도에서 열화시켜야 한다. 열화 온도를 높게 선택하면 시험 기간은 단축되지만 신뢰성에 대한 오차가 늘어나므로 적절한 온도를 선택하여 신뢰성과 시험 시간에 대한 이점을 살려야 한다.

3.2 열+전기 복합 열화 수명 평가

□ 기준 전압 레벨(pu) 결정

그림 1은 dc link 전압 1,500V 인가시 전인 전동기 단자에서의 과도 전압 파형으로 최대 피크 전압 V_m 은 2,700V이고 상승 시간은 0.7 μ s 정도로 전형적인 IGBT 구동시의 특성을 보여주고 있다. IEEE 792-1987에 따라 상승시간 0.7 μ s일 때의 반사파 비율 1.3배를 고려하여 전기적 열화에 필요한 기준 전압 레벨(pu)을 산정하면

- 1) 인버터 출력 피크 전압

$$U_{peak} = 1,500V(\text{가선}) + 600V(\text{spike 전압}) = 2,100V$$

2) 반사파를 고려한 전동기 입력의 선간 피크 전압

$$U_{Lpeak} = 1.3 \times 2,100V = 2,700V$$

3) 인버터 구동 전동기 입력의 상 피크 전압 변환

$$U_{rpeak} = 2,700V \times 2/3 = 1,800V$$

4) 인버터 구동 전동기 입력의 상 실효 전압

$$U_{Prms} = 1,800V / 1.414 = 1,270V_{rms}$$

로 계산된 1,270V_{rms}가 1pu로서 기준 전압이며, 각 상권선 초입 부분의 대지 절연은 이 전압을 경험하게 된다.

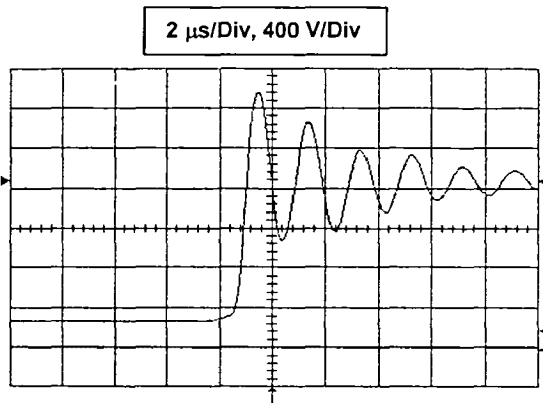


그림 1. 200kW, 1100V (1500Vdc) 건인전동기의 PWM 인버터 구동시 단자간 과전압 파형

□ PWM 임펄스 전압 모의

반사파 과전압은 주로 PWM 운전시 문제로 되며 전동차의 주행 패턴을 그림 2와 같이 고려할 때 전체 운행시간의 1/3(t1시간과 t2시간의 합) 정도를 차지한다. 따라서 전동기 수명 25년 동안의 PWM 펄스 전압 모의는 반사파 과전압 열화가 수십 kHz까지는 인가 주파수에 선형적으로 비례하는 것으로 알려져 있으므로, 임펄스

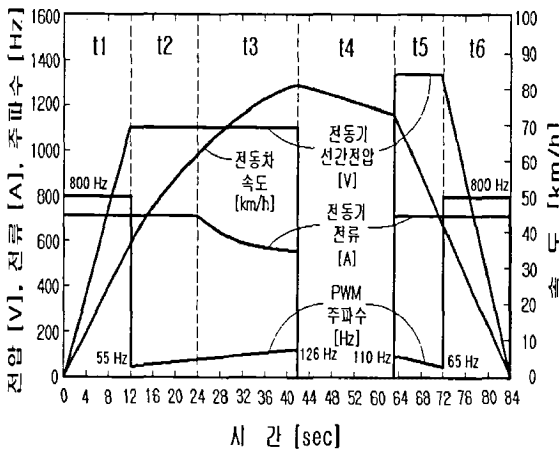


그림 2. 전동차의 주행패턴

스 파형의 주파수를 kHz 단위로 높여 가속 열화시킬 수 있는 인버터 모의 전원을 이용한다.

□ 열화 조건 및 주기 선정

그룹	전압 열화조건	열적 열화조건	열화 주기[일]										
			0	4	8	16	32	64	X	X	X	X	
1	4.5kV _{rms} (3수준)	235°C (3수준)	0	4	8	16	32	64	X	X	X	X	X
2	4.5kV _{rms} (3수준)	상온	0	X	8	16	32	64	128	X	X	X	X
3	전압인가 없음	235°C (3수준)	0	X	8	16	32	64	128	X	X	X	X
4	3.8kV _{rms} (1수준)	215°C (1수준)	0	X	X	16	32	64	128	256	X	X	X

- 1) 전압 열화 수준 1=3pu=3.8kV_{rms}
전압 열화 수준 3=3.5pu=4.5kV_{rms}
- 2) 온도 열화 수준 1=215°C, 수준 3=235°C

4. 시험 수행 방법

선택한 열화 조건 및 임펄스 시험 전압을 이용하여 열/전압 열화 시험을 그림 3과 같이 수행한다.

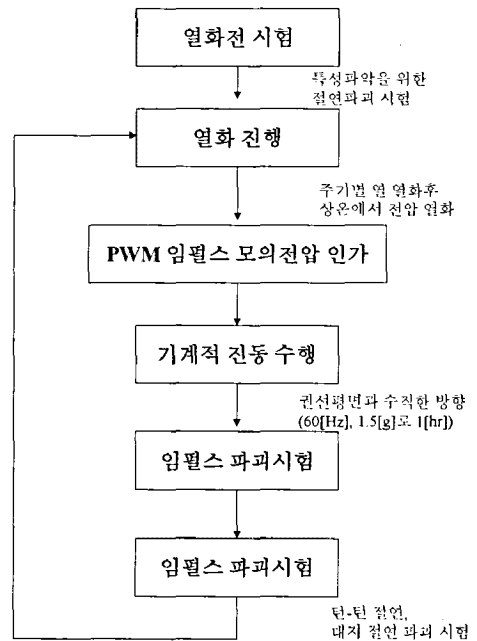


그림 3. 시험 수행 방법

5. 시험 결과 및 검토

인버터 구동 건인 전동기의 열/전압 열화 시험을 수

행한 후, 턴-턴 절연 및 대지 절연에 대해 각각 세로 축을 임펄스 파괴전압, 가로 축을 열 열화 일수로 하여 각 열화 그룹별로 plotting하고 직선을 그어 최저 허용 전압 수준과 만나는 점을 표기하면 그림 4와 같이 열, 전기 복합 열화에서의 예상 수명이 형성된다.

최저 허용전압 수준은 일반적으로 임펄스 내전압 레벨을 교류 내전압의 3배로 보는 경우가 많으므로, 본 연구에서는 임펄스 절연 파괴 스텝 시험의 시작 전압으로 고려하여 턴-턴 절연에 대해서는 $3pu(5.4kV_{peak})$ 로, 대지 절연에 대해서는 $5pu(9.0kV_{peak})$ 로 수행하였다.

그림 4에서 가장 열악한 조건인 전압레벨 3수준 ($4.5[kV_{rms}]$)과 열적 열화 레벨 3수준($235[^\circ C]$)이 적용되는 그룹 1은 150일의 예상 수명이 도출된다. 이것을 온도와 전압을 고려하여 살펴보면, 온도의 경우 $10[^\circ C]$ 수명 반감 법칙에 따라 $220[^\circ C]$ 일 때에는 두 배 즉, 300일 이상의 예상 수명이 기대된다. 또한 실제 전동기 운전 시의 온도인 $180[^\circ C]$ 정도로 환산하면, $220[^\circ C]$ 의 16배 즉, 4,800일로 생각할 수 있는데, 여기에 전압에 의한 반감을 고려하면 다시 2배가 되어 9,600일(약 26년) 이상의 수명이 기대되므로 만족할 만한 장기신뢰성을 기대할 수 있다.

그리고 1그룹보다 열화 레벨이 낮은 2, 3, 4그룹 또한 25년 이상의 수명이 보장된다고 할 수 있으므로 장기 신뢰성이 보장된다고 추정할 수 있다.

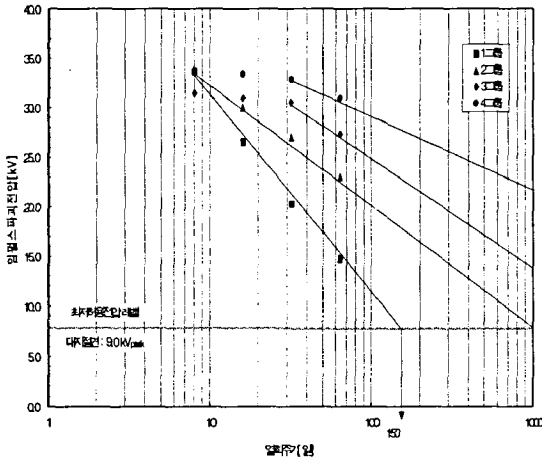


그림 4. 복합 열화시험에 의한 장기수명 평가 곡선

6. 결 론

본 연구에서는 회전 기기중 철도 차량용 건인 전동기가 인버터로 구동될 때 복합 열화 시험에 의한 장기수명을 평가하였다. 특히, 인버터 구동 건인 전동기의 절연 신뢰성을 보장하기 위해 기존의 시험 방법에 포함되

지 않은 고조파 손실과 과도 전압의 문제점을 고려하였으며, 열+전기 복합 열화 시험을 통해 형권 고정자 권선의 절연 신뢰성을 평가하였다. 평가 방법은 200 Class 고정자 형권 코일 권선 구조를 가진 철도 차량용 건인 전동기 개발 단계의 절연 신뢰성과 장기 예상 수명을 평가하는데 적용할 수 있을 것으로 기대되며, 향후 환경 조건을 포함하여 샘플 권선이 아닌 전동기 완성품을 대상으로 한 절연 신뢰성 평가 및 고장 진단에서 활용 가치가 클 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] A. Jouanne, etc, "Filtering Techniques to Minimize the Effect of long Motors Leads on PWM Inverter-Fed AC Motor Drive System", IEEE Trans.Ind.Appl., Vol.32. No.4, pp.919-925, 1996
- [2] Satoshi Ogasawara, "가변속 AC drive의 누설 전류. 서지 전압. 축전압과 그 대책", 日本電學論 D, 118권 9호, pp.975-980, 평성 10년
- [3] Paul T. Finlatson, "Output Filters for PWM Drives with Induction Motors", IEEE Ind. App. Mag., Jan./Feb. 1998.
- [4] Les Manz, "Motor Insulation System Quality for IGBT drives", IEEE Ind. App. Mag., Jan./Feb. 1997.
- [5] Gregory C. Stone & L.Edward Braswell, "Motor Insulation System", Motors Handbook, pp.427-456, Marcel Dekker, Inc., 1995